



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ZKOUŠKY PLECHU VE STROJÍRENSKÉ PRAXI

TESTS METAL SHEET IN THE ENGINEERING PRACTICE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Radek Ivančo

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Milan Dvořák, CSc.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Radek Ivančo
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	doc. Ing. Milan Dvořák, CSc.
Akademický rok:	2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Zkoušky plechu ve strojírenské praxi

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Přehled technologických zkoušek ocelových plechů zpracovaných v průmyslové praxi technologií tažením nebo ohýbáním.

V experimentální části bude pozornost zaměřena na tenké ocelové plechy s povlakem.

Cíle bakalářské práce:

Zpracovat rámcový přehled technologických zkoušek plechů pro vybrané technologie z plošného tváření se zaměřením na technologii tažení a ohýbání. Vedle odborné literatury použít i časopisecké studie z recenzovaných a impactovaných časopisů včetně zahraničních. V experimentální části bakalářské práce vyhodnotit zadanou technologickou zkoušku ocelového plechu dle zadání vedoucího bakalářské práce.

Seznam doporučené literatury:

BAČA, Jozef, Jozef BÍLIK a Viktor TITTEL. Technologია tvárnenia. Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2010. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 978-80-227-3242-0.

VOJTĚCH, Dalibor. Materiály a jejich mezní stavy. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2010. ISBN 978-8-7080-741-5.

DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. Technologie tváření. Plošné a objemové tváření. 3.vyd.Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. 169 s. ISBN 978-80-214-4747-9.

FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

ALTAN, Taylan a Tekkaya A. ERMAN. Sheet metal forming: fundamentals. Materials Park, OH: ASM International, 2012, 267 pp. ISBN 978-161-5038-428.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

IVANČO Radek: Zkoušky plechu ve strojírenské praxi.

Práce předkládá teoretickou rešerši zkoušek plechů, které se používají v průmyslové praxi. Na základě literární studie problematiky tváření plechů za studena byla provedena Erichsenova zkouška karosářských plechů DC06+ZE, CR340LA+GI/GA50-U, CR300LA+GI/GA50-U. Z výsledku zkoušky vyplynulo, že všechny plechy jsou vhodné pro tváření, jak uvádí dodavatel. S ohledem na problematiku zkoušení tenkých plechů byl navržen přípravek.

Klíčová slova: plech, tváření, zkouška, hluboké tažení, ohýbání

ABSTRACT

IVANČO Radek: Tests metal sheet in the engineering practise

The thesis presents the theoretical summary of tests metal sheets, which are used in industrial practice. Based on the literature study of cold metal forming was performed Erichsen test which tested body sheets DC06 + ZE, CR340LA + GI / GA50-U, CR300LA + GI / GA50-U. From the test result showed that all sheets are suitable for forming, as indicated by the supplier. It was designed product for testing thin sheets.

Keywords: steel sheet, forming, exam, deep drawing, bending

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

IVANČO, Radek. *Zkoušky plechu ve strojírenské praxi*. Brno, 2017, 40 s, 15 výkresů, 1 příloha, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce doc. Ing. Milan Dvořák, CSc.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Brně dne 26. 5. 2017

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu doc. Ing. Milanu Dvořákovi, CSc. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce včetně realizace zadané technologické zkoušky. Dále děkuji panu Ing. Liboru Křápkovi a firmě Kovovýroba Hoffmann s. r. o. za poskytnutí zkušebních vzorků a atestů. Závěrem bych rád poděkoval svým rodičům za umožnění studia a své přítelkyni za psychickou podporu v kritických chvílích studia.

OBSAH

Zadání	
Abstrakt	
Bibliografická citace	
Čestné prohlášení	
Poděkování	
Obsah	Str.
ÚVOD	9
1 TEORIE TVÁŘENÍ A TVAŘITELNOSTI	10
1.1 Charakteristika tváření	10
1.2 Vyhodnocování tvařitelnosti	11
2 VLASTNOSTI PLECHŮ KE TVÁŘENÍ	14
2.1 Struktura a vlastnosti	14
2.2 Stárnutí materiálu	15
2.3 Povrchové úpravy	16
2.4 Jakost a rozměrová přesnost	17
3 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ	18
3.1 Statická zkouška tahem	18
3.2 Zkoušky tvrdosti	21
4 ZKOUŠKY TECHNOLOGICKÉ	23
4.1 Zkouška hlubokotažnosti dle Erichsena	23
4.2 Kalíšková zkouška (Schmiedtova)	24
4.3 Gross – Engelhardtova zkouška	25
4.4 Zkouška rozšiřováním otvoru (dle Siebela a Pompa)	26
4.5 Fukuiho zkouška	27
4.6 Tomlenova zkouška (hydraulická)	28
4.7 Zkouška LDH/Nakajima	29
4.8 Zkouška lámavosti	30
4.9 Zkouška dvojitým ohybem	31
4.10 Zkouška střídavým ohybem	31
4.11 Zkouška dle Gütha	32
4.12 Zkouška zvlnění	32
4.13 Zkouška vybočením	33
4.14 Zkouška odpružení	34
5 EXPERIMENT – ERICHSENOVA ZKOUŠKA	35
5.1 Vyhodnocení vzorků	35
5.2 Návrh přípravku pro zkoušení velmi tenkých a malých vzorků	38
6 ZÁVĚRY	39
Seznam použitých zdrojů	
Seznam symbolů a zkratek	
Seznam výkresové dokumentace	
Seznam příloh	

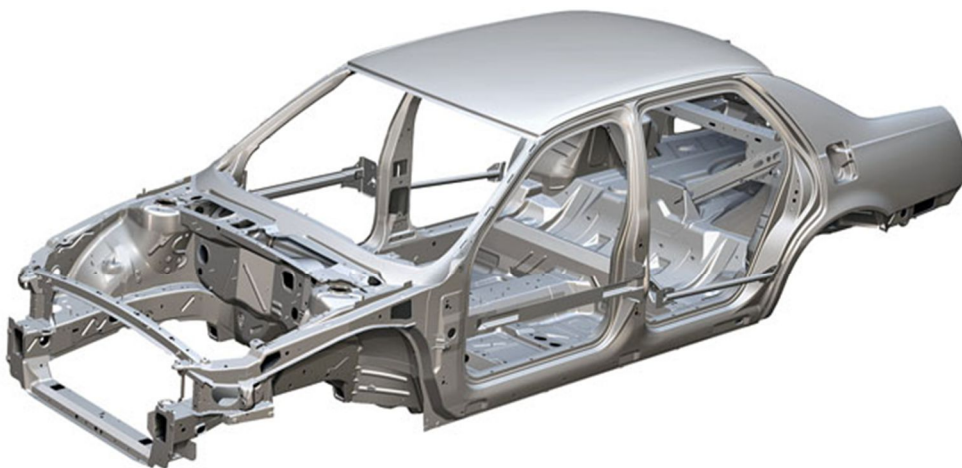
ÚVOD [2]

Již dlouhá léta je ve firmách snahou vyrábět s co nejmenším odpadem. Toto kritérium má velký ekonomický a hospodářský dopad. Ve všech technologiích je snahou přiblížit se v co nejvyšší míře tomuto kritériu, ale nejvíce se k němu blíží technologie tváření. V dnešní době se technologie tváření využívá ve spoustě strojírenských odvětví jako je automobilový průmysl, letectví apod. Tváření často zaručuje vysokou produktivitu výroby a zároveň je schopno zaručit velkou přesnost a vynikající mechanické vlastnosti výrobku, protože zde dochází vlivem deformace k tzv. deformačnímu zpevnění.

Tváření lze klasifikovat jako plošné a objemové. Tato práce je zaměřena hlavně na posuzování materiálu, zda je vhodný k plošnému tváření. U plošného tváření dochází k přeměně polotovaru (rondel, rozvin...) rovinného typu na prostorovou součást typu kalíšek za působení vnějších sil beranu stroje, které uvedou materiál do plastického stavu. V momentě, kdy je materiál v plastickém stavu, dojde k přeměně tvaru dle tvářecího nástroje. Tvářecí nástroj zde bývá dosti nákladnou záležitostí, ale zaručí vysokou produktivitu výroby, jelikož výlisek je vyroben do finálního stavu obvykle v několika krocích.

Aby však mohl proces probíhat bez závažných komplikací, je třeba zvolit správný materiál. K ověření zda je materiál vhodný k určitému typu plošného tváření je možné realizovat určitý typ zkoušky vlastností zvoleného materiálu. Obvykle se zjišťují vlastnosti strukturní, mechanické a technologické.

V současnosti je rozvoj tváření na vysoké úrovni a umožňuje výrobu součástí, které by jinak vyrobit nešlo. Příklad plošně tvářených součástí znázorňuje obr. 1.



Obr. 1 Soustava spojených plošně tvářených dílů [7]

1 TEORIE TVÁŘENÍ A TVAŘITELNOSTI

1.1 Charakteristika tváření [2], [6], [5], [14]

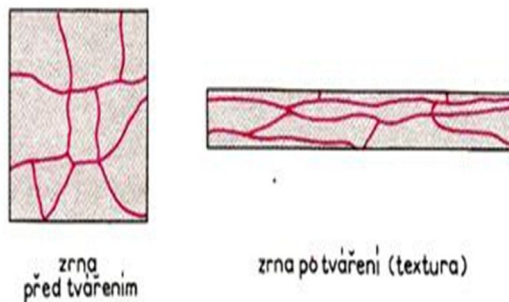
Tváření je proces, při kterém dochází ke změně tvaru výrobku nebo polotovaru a jeho vlastností. Proces je vyvozen působením vnějších sil od beranu stroje (lis, buchar, apod.), přičemž nedochází k odběru třísek. Tato technologie proto může být považována z velké části za bezodpadovou. Při tváření se materiál dostává do oblasti plastické deformace, která nastává po překročení meze kluzu daného materiálu, avšak nesmí být překročena hodnota meze pevnosti. Během procesu plastické deformace dochází ke změnám struktury materiálu, což má za následek změnu mechanických vlastností.

Při dobře vyladěném tvářecím procesu lze dosáhnout vysoké produktivity práce za dodržení přesnosti. Nevýhodou tváření jsou vysoké pořizovací náklady tvářecích strojů a nástrojů.

Rozdělení tváření:

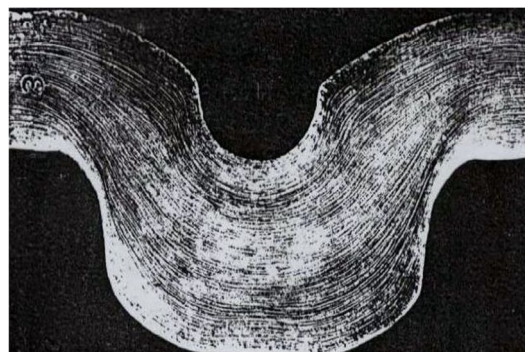
a) Rozdělení dle tvářecí teploty

Tváření za studena – probíhá pod teplotou rekrytalizace, dochází zde ke vzniku deformačního zpevnění, avšak deformační odpor je zde značně vyšší než u tváření za tepla. Deformace materiálu je ve směru tváření s postupným vyčerpáváním plasticity, což vede k značné deformaci zrn a vzniku deformační textury (viz obr. 2), proto se často kombinuje s tepelným zpracováním (rekrytalizační žíhání), aby se zdeformovaná zrna opět obnovila a materiál umožnil vyšší stupeň deformace. Výhodou této metody je rozměrová přesnost, dobrý stav povrchu bez okují, vysoká produktivnost a výrazné zvýšení mechanických vlastností (R_m). Nevýhodou je častá nutnost použít žíhacích pecí a potřeba vynaložit vyšší tvářecí sílu. Pro tváření plechů za studena sem řadíme např. tažení, kovotlačení apod.



Obr. 2 Materiál před a po tváření [14]

Tváření za tepla – probíhá nad teplotou rekrytalizace, opakovaně se zde obnovuje zrna a nedochází k vyčerpání plasticity materiálu. Umožňuje teoreticky neomezené přetvoření materiálu. Během procesu vzniká kvůli nečistotám na hranicích zrn vláknitá struktura (obr. 3), která vede ke zvyšování mechanických vlastností. Výhodou metody je vynaložení značně menší tvářecí síly a možnost výroby tvarově složitých dílů. Nevýhodou je vznik okují na povrchu součástí, které bývají často vtlačeny do povrchu (nutnost obrábění alespoň základních konstrukčních prvků). Mezi tyto procesy lze zařadit obvykle kování.



Obr. 3 Vláknitá struktura výkovku [14]

Tváření za poloohřevu – metoda která je svou podstatou tváření za studena, ale tvářecími teplotami se přibližuje k tváření za tepla. Dochází k deformačnímu zpevnění, avšak přetvárný odpor je nižší.

b) Rozdělení dle tepelného efektu

Izotermické tváření – je zde pomalá deformace, vzniklé teplo se odvádí do okolního prostředí a teplota kovu se tak nemění.

Adiabatické tváření – deformace je zde velmi vysoká, přičemž vzniklé teplo zůstává ve zpracovávaném materiálu, který se ohřívá.

Polytropické tváření – představuje kompromis mezi izotermickým a adiabatickým procesem, část tepla se odvádí a část zůstává v materiálu (nejčastěji).

c) Rozdělení dle působení vnějších sil

Plošné tváření – proces, při kterém vzniká z plošného polotovaru (přístříhu, rozvinu, apod.) prostorový díl typu kalíšek.

Objemové tváření – dochází k celkové změně tvaru polotovaru (špalíku, apod.) při zachování konstantního objemu.

1.2 Vyhodnocování tvařitelnosti [5], [2], [33]

Tvařitelnost je schopnost materiálu měnit svůj tvar za působení vnějších sil aniž by došlo k porušení soudržnosti, přičemž jsou přesně stanoveny podmínky. Tahle charakteristika zároveň určuje celkovou vhodnost materiálu ke tváření. Lze rozlišovat dva základní faktory ovlivňující technologickou tvařitelnost:

- ❖ Geometrický – určuje maximální možnou změnu rozměrových a tvarových charakteristik.
- ❖ Silový – určuje velikost tvářecí síly, která je zapotřebí k vyvolání plastického přetvoření. Radí se sem velikost síly od beranu stroje resp. přirozený přetvárný (deformační) odpor materiálu.

Název tvařitelnosti je obvykle odvozen od daného technologického procesu např. kovatelnost, lisovatelnost, apod.

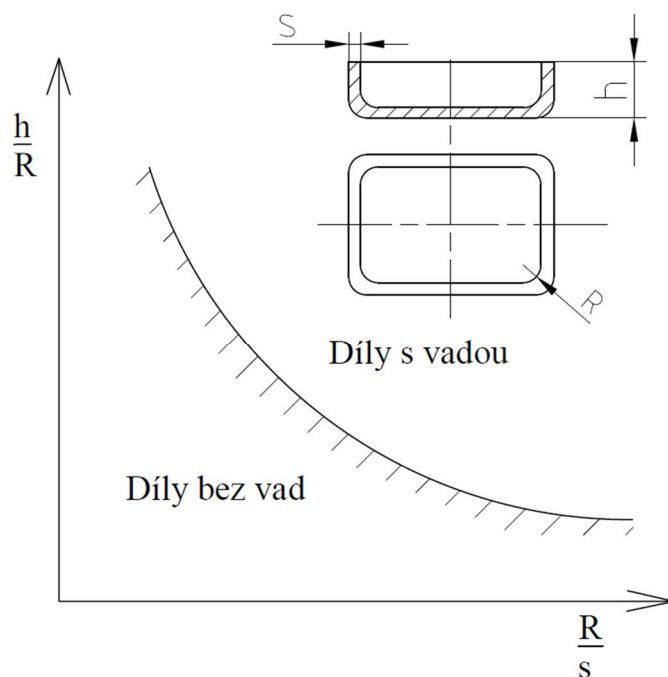
Zkoušky technologické tvařitelnosti se na rozdíl od běžných zkoušek jako je například zkouška tahem/tlakem nebo zkouška tvrdosti liší tím, že se snaží nejvíce přiblížit reálným podmínkám, při kterých bude probíhat zvolený typ procesu. Obvykle se taky snaží rozšířit základní typy zkoušek (např. zkouška tahem udává informace o tahu pouze v jednom směru oproti Erichsenově zkoušce, která ukazuje, jak se materiál bude chovat, pokud tah bude působit ve více směrech)

Je třeba rozlišovat:

- a) Tvařitelnost za studena – zkoušky které se snaží přiblížit operacím, jako jsou lemování, ohýbání, tažení, lisování apod.. Je tedy zřetelné, že se používají v závodech, které pracují s plechem.
- b) Tvařitelnost za tepla – vlastnosti se zde zkouší např. pēchováním, válcováním, rozkováním apod.

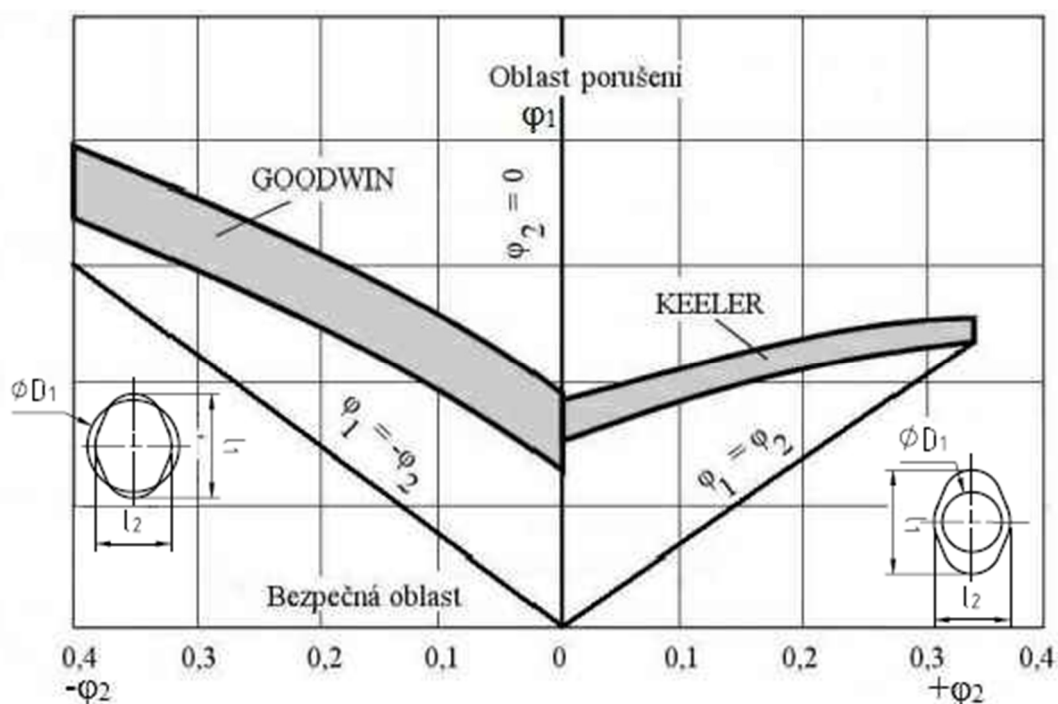
Z naměřených údajů technologických zkoušek nebo počítačových simulací pak bývají často sestaveny diagramy. Nejpoužívanějšími diagramy jsou:

- DMP - diagramy mezní plastičnosti – platí pro plošné i objemové tváření, ale jsou spíše teoretické.
- DMPT – diagramy mezní technologické tvařitelnosti (Woodova typu) – vyloženě praktické, každá technologie má svůj diagram, na osách jsou parametry výrobku (viz obr. 4)



Obr. 4 Diagram mezní technologické tvařitelnosti [5]

- Procesní mapy – na osách jsou parametry procesu
- DMT – Keeler – Goodwina (viz obr. 5) – platí pouze pro plošné tváření. Jejich výhodou je univerzálnost, protože jsou použitelné pro všechny technologie. Diagram lze využít na analýzu, zda dojde, během procesu tváření k porušení materiálu popř. je možné zjistit bezpečnost procesu. Polohu křivek lze ovlivnit jakostí plechu, tloušťkou, exponentem deformačního zpevnění apod. Na svislé ose je nanesen parametr nejvyšších tahových logaritmických přetvoření ϕ_1 , na vodorovné ose hodnoty deformací $\pm\phi_2$.



Obr. 5 Diagram Keeler - Goodwin [11]

- Teoretické křivky – získané z počítačových simulací

Deformaci dílu je možné zjistit sledováním deformace deformační sítě, kterou lze nanést některým způsobem na povrch součásti. Síť se skládá z pravidelně uspořádaných pravidelných tvarů obvykle trojúhelníků (MKP), čtverečků či kružnic. Změřením původního a zdeformovaného stavu lze pak stanovit velikost logaritmické deformace dle následujících vztahů (1.1) a (1.2), které vychází z obr. 5.

Velikost logaritmické deformace:

$$\text{Hlavní log. deformace: } \varphi_1 = \ln \frac{l_1}{D_1} [-] \quad (1.1)$$

$$\text{Vedlejší log. deformace: } \varphi_2 = \ln \frac{l_2}{D_1} [-] \quad (1.2)$$

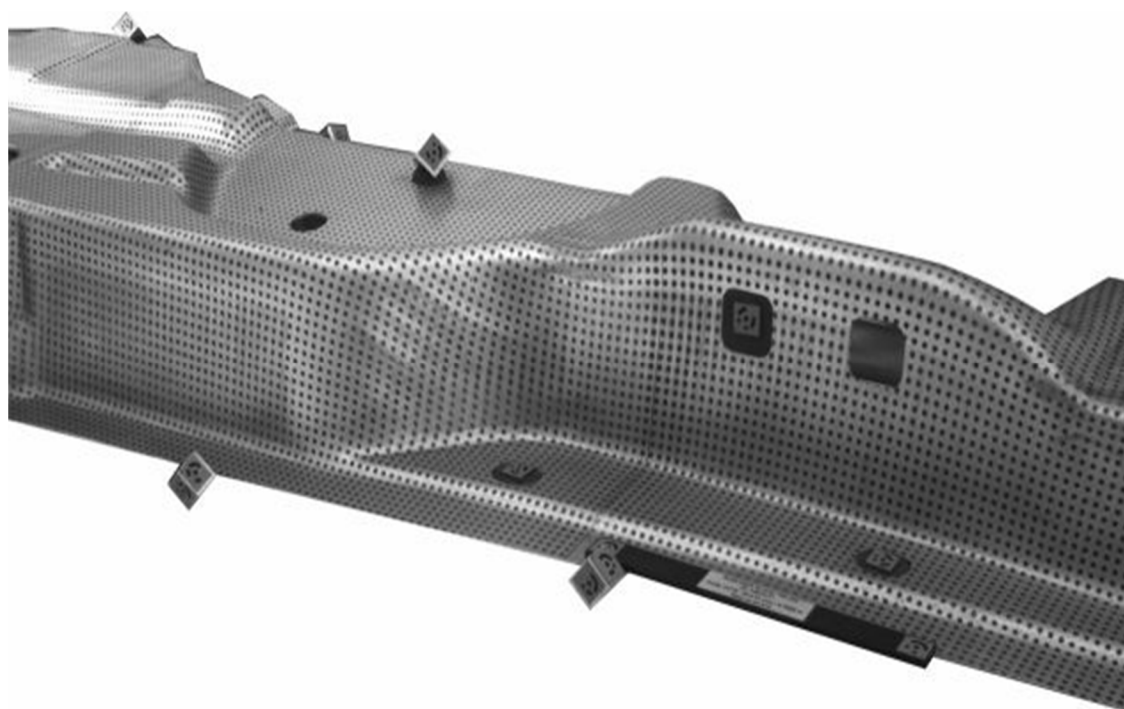
Kde: $l_{1,2}$ – délka zdeformované deformační sítě po tváření [mm]

D_1 – původní rozměr deformační sítě [mm]

Hodnota logaritmické deformace dosahuje hodnot kladných i záporných. Je-li tato hodnota kladná, znamená to, že se jedná o deformaci vyvolanou tahem a opačně.

Možnosti nanášení sítí:

- * Orýsování
- * Gumový váleček
- * Sítotisk
- * Ofsetem
- * Fotograficky
- * Fotochemicky
- * Elektrochemicky



Obr. 6 Ukázka deformační sítě na výlisku [34]

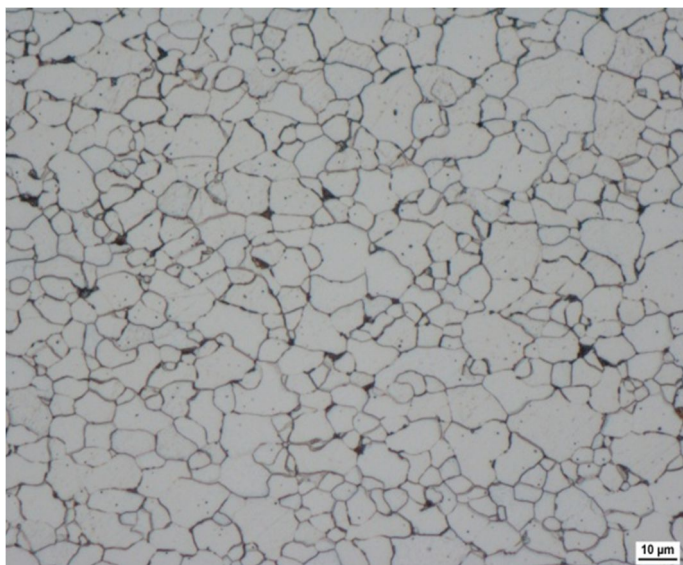
2 VLASTNOSTI PLECHŮ KE TVÁŘENÍ

Tvářecí procesy se mohou pohybovat od jednoduchých úkonů až po tváření vysoce složitých dílů. V dnešní době se na trhu vyskytuje široká škála plechů určených pro tváření. Aby mohly vznikat výrobky splňující všechny nároky zákazníka, je třeba vědět, jaký druh materiálu je potřeba zvolit, aby se během tvářecího procesu choval dle očekávání.

2.1 Struktura a vlastnosti [5], [1], [13]

Faktory, které nejvíce ovlivňují tvařitelnost plechu jsou především mikrostruktura, chemické složení a textura materiálu.

Hlubokotažné plechy obvykle obsahují 0,03 až 0,10 % uhlíku (C), 0,15 do 0,50 % manganu (Mn), do 0,035 % fosforu (P), do 0,04 % síry (S) a 0,025 až 0,035 % hliníku (Al). Mangan není příliš žádoucí prvek, jelikož zvyšuje pevnost a tvrdost plechů, přičemž klesá jeho houževnatost, avšak je zde nezbytný, protože na sebe váže síru a tvoří tak sulfidy manganu, které mají dobrou tvařitelnost. Nízkouhlíkové plechy obsahují kromě uvedených chemických prvků taky plyny a ostatní doprovodné prvky, které se do materiálu dostávají během tavby ze surového železa a ocelového odpadu. Za doprovodné prvky můžeme považovat měď, nikl, chrom a molybden. Tyto prvky obvykle zvyšují pevnost, a proto má být jejich obsah co nejmenší. Plechy určené pro hluboký tah bývají dodávány z hutí v uklidněném i neuklidněném stavu. Během procesu uklidňování se do materiálu dostávají navíc tzv. stabilizační prvky. Mezi tyto prvky se většinou řadí titan, niob, vanad, hliník, zirkonium a bór.



Obr. 7 Feritická matrice s nízkým obsahem uhlíku [22]

Mechanické vlastnosti a tvařitelnost plechu je velmi ovlivněna mikrostrukturou. Se stoupajícím obsahem uhlíku stoupá i množství cementitu ve struktuře, přičemž se požaduje jeho globulární vyloučení, které je pro tváření příznivější. U cementitu je důležitý jeho tvar a rozmístění, protože je tvrdý tzn. netvárný a proto by jeho vysoký obsah způsoboval vznik trhlin během tváření. Z toho důvodu se v oblasti tváření plechů používají plechy výhradně s feritickou (viz obr. 7) či feriticko-perlitickou matricí nejlépe se zploštělým zrnem. Velikost feritických zrn má následně vliv na výslednou jakost tvářeného dílu. Plechy s vyšším obsahem uhlíku se většinou lisují za tepla (např. kalené dílce karoserie automobilu). Ve spoustě druhů materiálů se často vyskytují taky vměstky, které taktéž snižují tvařitelnost. Druh, velikost a počet vměstků se hodnotí tzv. mikročistotou oceli.

Chování plechu při procesu tváření lze nejlépe předvídat vykonáním mechanických a technologických zkoušek.

2.2 Stárnutí materiálu [5], [6]

Při stárnutí plechů dochází k samovolným změnám jeho vlastností. Během procesu stárnutí se původní struktura mění na strukturu novou. Hlavní příčinou tohoto jevu je shlukování atomů uhlíku a dusíku u dislokací, přičemž dusík zde hraje podstatnější roli. Tyto shluky atomů pak brání dislokacím v pohybu a omezují tak značně tvařitelnost daného materiálu.

Materiály, které jsou nejvíce náchylné ke stárnutí, jsou obvykle nízkouhlíkové oceli se zvýšeným obsahem dusíku. Procesu stárnutí lze předejít chemickou cestou během tavby v ocelárně vázáním dusíku na prvky s vyšší afinitou (často hliník, vanad, titan, bor) nebo malou plastickou deformací, která vede k uvolnění dislokací.

Stárnutí se při tahové zkoušce projeví zvýšením napětí a zvýrazněním meze kluzu (především nárůstem horní meze kluzu). Výrazná horní mez kluzu (viz obr. 8) vznikla vlivem napětí, které bylo třeba k uvolnění a skluzu dislokací.

U ocelových plechů se nejčastěji klasifikují dva hlavní druhy stárnutí:

- Stárnutí po rychlém ochlazení – často se vyskytuje u plechových kalených dílců vyrobených z neuklidněné oceli. Rychlým ochlazením se ve struktuře zadrží velké množství uhlíku a dusíku. Obecně zde platí, že se stoupající teplotou se proces stárnutí urychluje.
- Deformační stárnutí – dochází k interakci intersticiálních atomů uzavřených v krystalické mřížce daného materiálu. Snahou uhlíku a dusíku je za pomoci difuze zaujmout energeticky nejlepší polohu, která se většinou vyskytuje v okolí dislokací, kde se hromadí a působí tak překážku, kterou je třeba při tváření překonat vyšším napětím. Rozdílem napětí mezi vystárlým materiálem a původním se pak nazývá *index stárnutí* (pro hlubokotažné plechy se pohybuje mezi 40 a 80 MPa)

Stárnutí plechů lze vyvolat i umělým způsobem a to zvýšením teploty. Této vlastnosti se využívá při zkoušení náchylnosti plechů ke stárnutí. Doba, kterou je třeba materiál držet na zvýšené teplotě se pak určí ze vztahu (2.2).

$$\log \frac{t_0}{t} = 4\,400 \cdot \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) - \log \frac{T}{T_0} \quad (2.2)$$

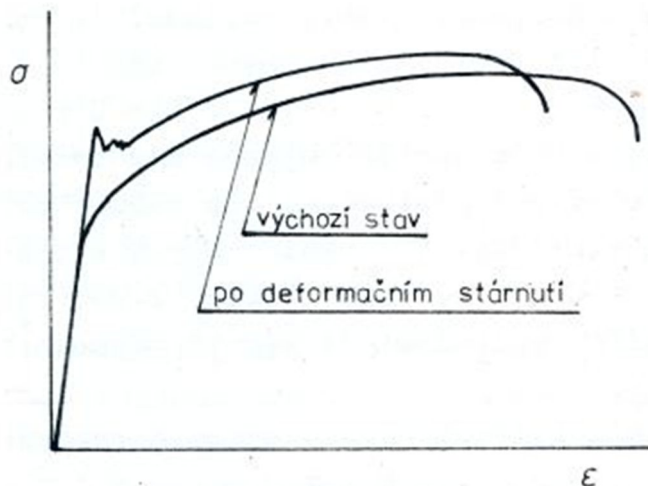
Kde: t_0 – čas stárnutí při 20 °C \approx 293,15 K [h].

t – hledaná veličina – doba stárnutí při zvýšené teplotě [h]

T_0 – 293,15 K

T – zvýšená teplota, při kterém umělé stárnutí probíhá [K]

Uvedený vztah platí pouze pro rozmezí teplot 20 °C až 100 °C



Obr. 8 Tahový diagram původního a vystárlého materiálu [15]

2.3 Povrchové úpravy [5], [23], [28], [35]

Dnešní doba často klade nárok na vzhled nebo funkci povrchu plechu a proto byla vyvinuta celá řada povlaků, nátěrů apod. Povrchově upravený plech vzniká nanesením určité tenké vrstvy přídavného materiálu na kovový podklad (plech válcovaný za studena s požadovaným chemickým složením a mechanickými vlastnostmi). Nejčastější druhy povlaků, které se v běžném strojírenství používají, jsou obvykle na bázi kovů jako je např. zinek, hliník, chrom, cín, atd., avšak vyrábí se i plechy s povrchovou vrstvou plastu, nátěru či smaltu.

Nejčastěji používané plechy:

- Pozinkované – jsou jedním z nejrozšířenějších plechů, které nacházejí uplatnění ve všech odvětvích. Vrstva zinku zde chrání plech před korozi. Zinek s železem tvoří elektrický článok, což má za následek korodování pozinkované vrstvy. Plech je chráněn tak dlouho, dokud nedojde k rozpuštění vrstvy zinku.

Nejčastější metody nanášení zinku jsou buď žárovým nástřikem (či namočením) nebo galvanickou cestou, kde zinek tvoří anodu a čistý plech katodu (viz obr. 9).

U žárových nástřiků se množství zinku pohybuje od 60 do 450 g/m² (oboustranně), přičemž tloušťka vrstvy je v rozmezí 10 - 25 μm. Gramáž nástřiku bývá uvedena ve značce materiálu např. plechu DX51D+Z275 odpovídá materiál DX51D s 275 g/m² zinku.

Povlaky nanášené galvanicky bývají ve vrstvách tenčích v rozmezí 3 až 5 μm.

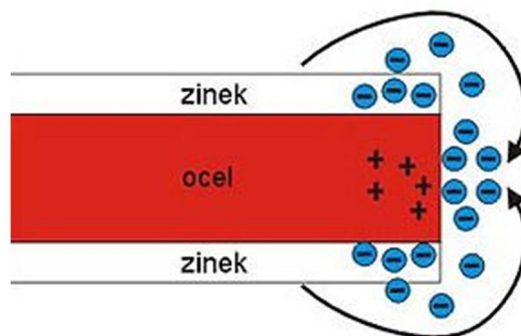
Pozinkované plechy se hodí pro většinu druhů plošného tváření (tažení, stříhání, apod.) a velmi hojně jsou využívány např. v automobilovém průmyslu na části karoserií. Jsou dodávány jako svitky nebo tabule.

- Pocínované – velmi často se používají v elektrotechnice a hlavně v potravinářství, protože cín má oproti zinku tu vlastnost, že nereaguje s potravinami.

Vrstva cínu zde nejen chrání povrch proti korozi, ale zároveň může sloužit jako mezivrstva například pro nátěr. Pocínované plechy jsou dodávány jako žárově stříkané (nebo namáčené) či elektrolyticky cínované.

- Pohliníkové – mají dobrou odolnost vůči chemikáliím, vyšším teplotám a korozi. Povlak bývá nanášen technologií máčení do roztavené lázně s příměsí dalších prvků (křemík, hořčík, aj.) pro snížení přechodové vrstvy.

- Pochromované – mohou nahrazovat plechy pocínované. Často se používají z estetického hlediska, protože chrom je charismatický svým vysokým leskem (viz obr 10). Vrstva se nanáší elektro-chemickou cestou na připravený povrch. Proces probíhá nanesením první vrstvy mědi, druhé vrstvy niklu a následně vrstvy chromu.



Obr. 9 Princip galvanického zinkování [28]



Obr. 10 Ukázka chromované nádrže motocyklu [16]

2.4 Jakost a rozměrová přesnost [5], [35]

Ve strojírenském průmyslu existuje celá řada jakostí a přesností dodávaných plechů. Tyto vlastnosti bývají ovlivněny především výrobou v ocelárnách resp. ve válcovnách.

Plech s větší tloušťkou se obvykle válcují za tepla z velkých bloků tzv. bram a jejich vlastnosti jsou tak často ovlivněny např. válcovacími teplotami, velikostí změny tloušťky... Tlusté plechy se pak dále používají jako polotovary pro výrobu plechů tenkých (nebo jako konečný produkt), které se válcují za studena, čímž získávají specifické vlastnosti jako je lepší kvalita povrchu, dobrá tvárnost apod. Během procesu výroby dochází ke vzniku zpevněné vláknité struktury, která je orientována ve směru válcování. Po válcování se vzniklá struktura odstraní rekrytalizačním žíháním, což způsobí obnovu tvárných vlastností.

Jakost povrchu stanovuje příslušná norma. Z hlediska plechů určených ke tváření musí být povrch rovný a lesklý (resp. matný) bez nečistot, které by během tváření činily značné potíže.

Z hlediska přesnosti lze rozlišovat:

- Tlusté plechy nad 4 mm – hodnota tolerance řádově v desetinách (až jednotkách) mm.
- Tenké plechy v rozmezí 0,4 až 4 – hodnota tolerance v setinách až desetinách mm.
- Velmi tenké plechy do 0,4 mm – hodnota tolerance v setinách mm.

K zákazníkovi jsou dodávány na paletách ve stanovených rozměrech tabule délka x šířka (např. 1 000 x 2 000 mm) nebo jako svitky (viz obr. 11), které si pak zákazník stříhá na potřebný rozměr.



Obr. 11 Plechový svitek [17]

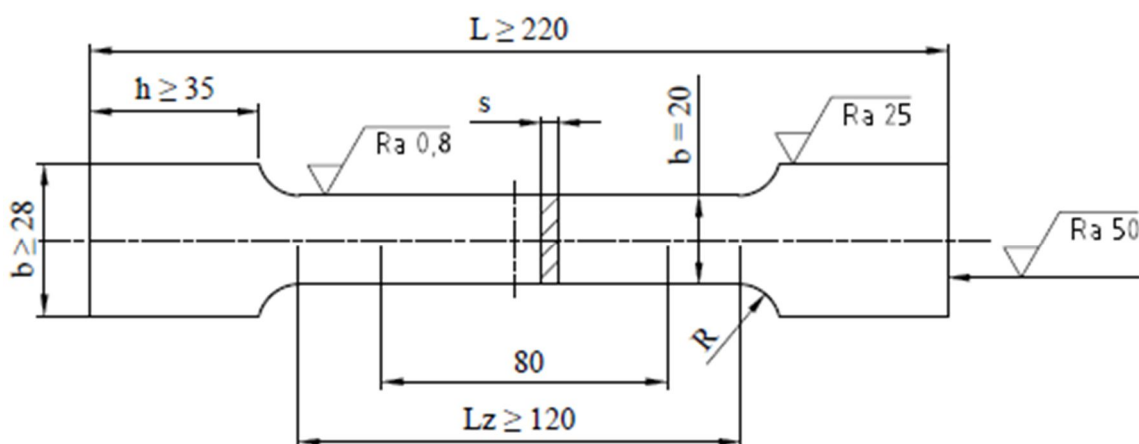
3 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ [36]

Zkouškami mechanických vlastností se stanovuje chování materiálu v závislosti na působení vnějších sil. Lze říci, že některé mechanické vlastnosti mohou být chápány jako odpor materiálu proti deformování (tvrdost, různé druhy mezí...) a některé naopak říkají jakou schopnost má materiál se deformovat (tažnost, zúžení...). Z hlediska tváření kovů je hledán materiál takový, který je schopen velkých deformací bez porušení.

3.1 Statická zkouška tahem [5], [36], [29], [25]

Během tahové zkoušky je zkušební vzorek upnut v čelistích trhačického stroje a natahován do momentu přetržení. U tenkých plechů se tato zkouška provádí především na plochých vzorcích obdélníkového průřezu (viz obr. 12), které můžou být odebrány ve třech směrech – vzhledem ke směru válcování kvůli různým mechanickým vlastnostem v různých směrech – plošná anizotropie (ve směru, pod 45° ke směru a kolmo na směr válcování). Průběh zkoušky se zaznamenává do tzv. tahového diagramu (viz obr. 13) ze kterého lze stanovit několik druhů mezí. Ze stanovených mezí pak lze určit další charakteristiky zkoušeného plechu.

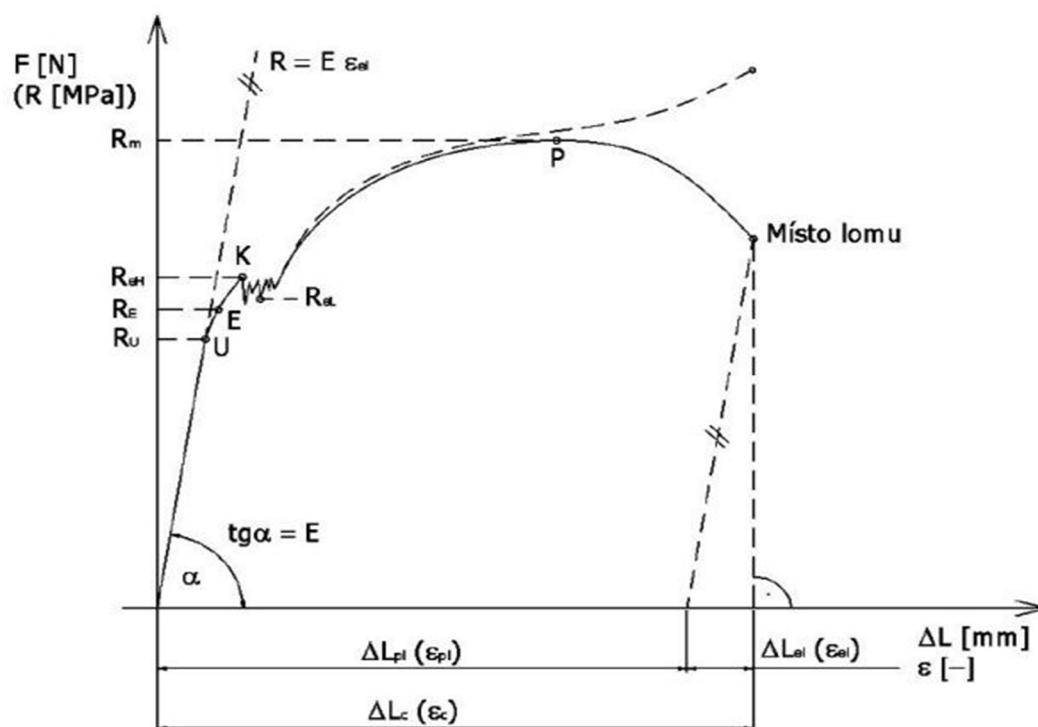
V České republice se tahová zkouška řídí dle ČSN EN 10002-1, která je stejná jako EN 10002:90



Obr. 12 Tvar a základní rozměry zkušební vzorku [5]

Nejvýznamnějšími výstupy tahové zkoušky jsou:

- mez pevnosti (R_m)
- mez kluzu – výrazná (R_e) či smluvní ($R_{p0,2}$)
- tažnost (A_{80})
- kontrakce (Z)
- hodnota plošné anizotropie ($A_{Re(\alpha)}$)
- hodnota plastické anizotropie, která působí kolmo na plech (R_α)
- exponent zpevnění materiálu (n)
- zásoba plasticity (ZP)



Obr. 13 Tahový diagram s výraznou mezí kluzu [29]
 – Smluvní diagram, ---- skutečný diagram

Napětí na mezi úměrnosti (U) σ_U / R_U – přímková část diagramu, platí zde Hookův zákon. Při odlehčení se zkušební vzorek vrátí do výchozího stavu.

Napětí na mezi pružnosti (E) σ_E / R_E – po překročení meze úměrnosti se přímka začne velmi mírně odchylovat od lineárního stavu. Při dosažení σ_E v materiálu vzniká nepatrná deformace 0,005 % původní délky vzorku.

Napětí na mezi kluzu (K) $\sigma_K / R_e / R_{p0,2}$ – materiál získává trvalé deformace – začátek oblasti tváření. Mez kluzu může vzniknout výrazná nebo nevýrazná (stanovuje se tzv. smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$). Hodnota smluvního napětí je dána vztahem:

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} [\text{MPa}] \quad (3.1)$$

Kde: F_e – síla na mezi kluzu [N]

S_0 – počáteční plocha průřezu [mm^2]

Napětí na mezi pevnosti (P) σ_P / R_m – maximální hodnota smluvního napětí, které lze dosáhnout u daného materiálu. Končí zde oblast tváření a po jejím překročení dochází k samovolnému mírnému poklesu napětí a přetržení zkušební vzorku. Hodnota smluvní meze pevnosti se stanoví ze vztahu:

$$R_m = \frac{F_{max}}{S_0} [\text{MPa}] \quad (3.2)$$

Kde: F_{max} – maximální síla, která byla naměřena [N]

Tažnost A_{80} – je dána vztahem:

$$A_{80} = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 [\%] \quad (3.3)$$

Kde: L_u – délka vzorku po přetržení [mm]

L_0 – počáteční délka vzorku [mm]

Kontrakce Z – určuje procentuální zúžení průřezu po přetržení, stanovuje se vztahem:

$$Z = \frac{S_u - S_0}{S_0} \cdot 100 [\%] \quad (3.4)$$

Kde: S_u – průřez vzorku po přetržení [mm^2]

S_0 – počáteční průřez vzorku [mm^2]

Plošná anizotropie $A_{Re(\alpha)}$ – ovlivněna podmínkami výroby v ocelárně. Ukazuje rozdílné vlastnosti materiálu v různých směrech s ohledem na směr válcování. K výpočtu plošné anizotropie je třeba znát základní výsledky tahové zkoušky. Je dána vztahem (3.5), který lze aplikovat i na další hodnoty zjištěné tahovou zkouškou:

$$A_{Re0,2} = \frac{R_{p0,2}(\alpha^0) - R_{p0,2}(0^0)}{R_{p0,2}(0^0)} [-] \quad (3.5)$$

Kde: $R_{p0,2}$ – smluvní mez kluzu (v tomto případě nevýrazná) [MPa]

0^0 – daná hodnota zjištěná ve směru válcování

α – daná hodnota zjištěná pod odpovídajícím úhlem

α – vzorky se obvykle řezou 45^0 nebo 90^0 ke směru válcování

Plastická anizotropie R_α – hodnota, která vyjadřuje náchylnost plechu ke ztenčení. Hodnota plastické anizotropie se opět zjišťuje na vzorcích vyřezaných pod různými úhly ke směru válcování. Lze ji vyjádřit jako podíl logaritmické deformace šířky a tloušťky:

$$R_\alpha = \frac{\ln \frac{b_0}{b}}{\ln \frac{s_0}{s}} [-] \quad (3.6)$$

Kde: b – velikost šířky zkušební vzorku před zkouškou [mm]

b_0 – velikost šířky vzorku při dosažení 20 % plastické deformace [mm]

s – velikost tloušťky vzorku před zkouškou [mm]

s_0 – velikost tloušťky vzorku při 20 % plastické deformace [mm]

Tvařitelnost plechu se pak určí hodnotou váženého průměru vypočteného z anizotropií pro jednotlivé směry součinitelem plastické anizotropie \bar{R} , který by se měl pohybovat okolo 2.

$$\bar{R} = \frac{1}{4} (R_{0^0} + 2R_{45^0} + R_{90^0}) [-] \quad (3.7)$$

Kde: $R_{0^0}, R_{45^0}, R_{90^0}$ - zjištěné hodnoty anizotropií pro různé směry vyřezání vzorků.

Zásoba plasticity ZP – je ovlivněna především výškou meze kluzu a pevnosti. Pokud bude materiál vykazovat nízkou mez kluzu a vysokou mez pevnosti pak lze říci, že takový materiál má vysokou zásobu plasticity a naopak. Lze ji stanovit jako:

$$ZP = k \cdot (R_m - R_e) \cdot \varepsilon_{max} [\text{MPa}] \quad (3.8)$$

Kde: k – součinitel – volí se 0,75 pro nevýraznou mez kluzu nebo

0,67 pro výraznou mez kluzu

ε_{max} – maximální poměrné přetvoření [-]

3.2 Zkoušky tvrdosti [5], [30], [37], [18], [25]

Tvrdost je mechanická vlastnost materiálu vyjadřující odpor proti vniku cizího předmětu. Principem zkoušek tvrdosti je vtlačování tzv. indentoru daného tvaru kolmo do povrchu materiálu. Následné vyhodnocování tvrdosti se provádí buď podle hloubky vtisku nebo velikosti plochy vtisku.

Pro měření tvrdosti tenkých plechů se používá nejčastěji metoda dle Vickerse nebo Rockwella a pro plechy tlusté lze využít metody Brinellovi.

Měření tvrdosti se v případě tváření plechů využívá hlavně jako orientační metoda stanovení jeho mechanických vlastností pomocí přepočteních vztahů.

Zkouška tvrdosti dle Vickerse:

Tato zkouška spočívá ve vtlačování tělesa tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu s vrcholovým úhlem 136° do povrchu zkušební vzorku (viz obr. 14). Tvrdost materiálu se hodnotí z průměrné hodnoty velikostí úhlopříček vtisku. Zatěžující síla může dosahovat hodnot od 10 do 1 000 N, přičemž doba zátěže bývá od 10 do 180 s. Pro běžné aplikace se obvykle používá 300 N s dobou zátěže v rozmezí 10 až 15 s.

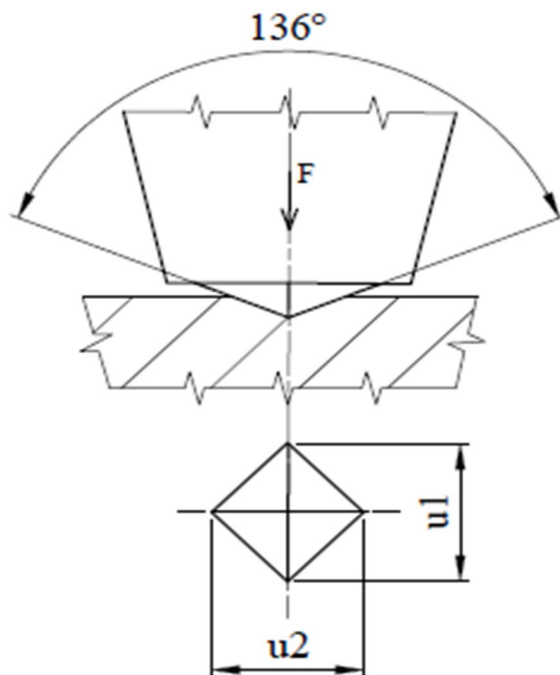
Tvrdost dle Vickerse se značí jako $HV\ xxx$ (Vickers hardness), kde „xxx“ je zjištěná hodnota tvrdosti např. $HV\ 150$. Hodnotu tvrdosti je možné vypočíst ze vztahu:

$$HV = 0,189 \cdot \frac{F}{u^2} [-] \quad (3.9)$$

Kde: F – zatěžující síla [N]

u – průměrná hodnota úhlopříček [mm]

Velikost tvrdosti však lze určit i tabelárně dle velikosti zatížení a velikosti úhlopříčky.



Obr. 14 Schéma Vickersovi zkoušky
[18]

Zkouška tvrdosti dle Rockwella:

Rockwellova zkouška spočívá ve vtlačování zkušební tělesa tvaru jehlanu s vrcholovým úhlem 120° nebo kuličky průměru $1,59 \text{ mm}$ do povrchu zkušební vzorku. Tvrdost se určuje z velikosti průměrné hloubky vtisku (viz obr. 15). Tvrdost dle Rockwella se značí HR_x (Rockwell hardness), kde „x“ je druh metody. Jelikož je třeba vyloučit nerovnosti povrchu, je v prvním kroku měření nastavena tzv. předzátěž F_p s velikostí 100 N . Po nastavení předzátěže se přístroj odjistí a dle druhu použité metody (HRA , HRB , HRC ...) se zatíží silou F_z ve které je již zahrnuta předzátěž. Doba měření je obvykle 10 až 15 s . Po zajištění přístroje se zátěž sníží na velikost předzátěže. Tvrdost se odečte přímo na přístroji.

Nejčastěji se používají metody:

HRA – Používá se hlavně pro měření tenkých povlaků, slinutých karbidů apod.

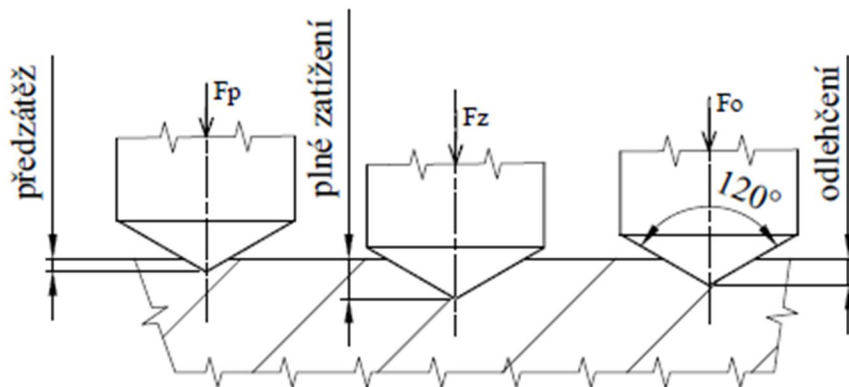
Tvar indentoru: kužel (120°); velikost zátěže: 600 N

HRB – Obvykle pro materiály s nižší tvrdostí, které jsou mimo stupnici HRC

Tvar indentoru: kulička ($1,59 \text{ mm}$); velikost zátěže: $1\,000 \text{ N}$

HRC – Často se používá pro měření tvrdých materiálů např. po zakalení apod.

Tvar indentoru: kužel (120°); velikost zátěže: $1\,500 \text{ N}$



Obr. 15 Schéma Rockwellovi zkoušky [30]

Zkouška tvrdosti dle Brinella:

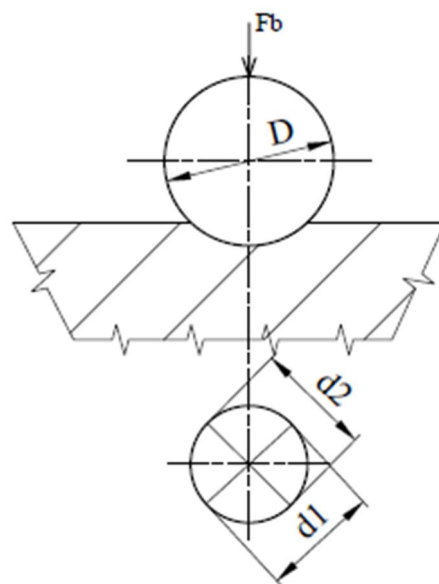
Principem je vtlačování kuličky daného průměru D (1 ; $2,5$; 5 ; 10 mm) do povrchu zkoušeného vzorku (viz obr. 16). Měří se velikost dvou navzájem kolmých průměrů vtisku d_1 a d_2 . Průměr kuličky je volen dle tloušťky měřeného materiálu, který by měl být alespoň desetkrát větší než je hloubka vtisku. Doba zátěže je obvykle pro ocel 10 až 15 s . Měření průměrů bývá ovlivněno vytlačeným resp. vtaženým materiálem kolem vtisku. Z důvodu vytlačení materiálu bývá často průměr vtisku nesouměrný.

Tvrdost se značí HB $D/F/t$ (Brinell hardness) kde D je průměr kuličky, F velikost zátěže, t doba měření a lze ji vypočítat ze vztahu:

$$HB = \frac{(0,102 \cdot F_b)}{S_v} [-] \quad (3.10)$$

Kde: F_b – zatěžující síla [N]

S_v – plocha kulového vrchlíku [mm^2]



Obr. 16 Schéma Brinellovi zkoušky [37]

4 ZKOUŠKY TECHNOLOGICKÉ [5]

Zkoušky technologické se snaží principiálně přiblížit k danému technologickému procesu. Často taky rozšiřují zkoušky běžné, základní jako je např. tahová zkouška apod., které sami o sobě neříkají dostatek informací o vhodnosti materiálu k určitému tvářecímu procesu. Technologické zkoušky do zkušebního tělesa vnášejí nejen napětí, ale i deformaci, čímž se od běžných zkoušek výrazně liší a mají tak blíže k reálnému procesu.

4.1 Zkouška hlubokotažnosti dle Erichsena [5], [6], [9]

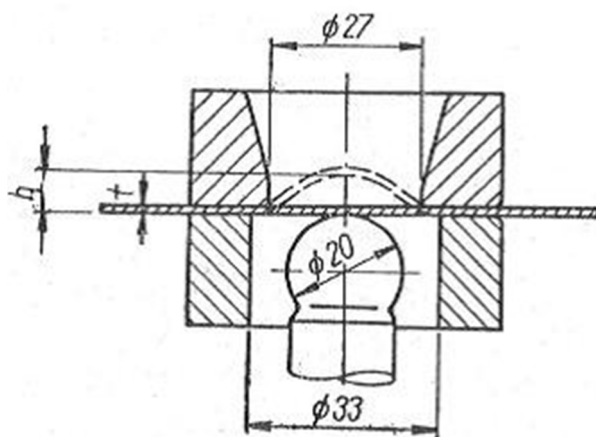
Zkouška hlubokotažnosti dle Erichsena je jednou z nejzákladnějších technologických zkoušek tenkých plechů, která posuzuje vhodnost plechu k hlubokému tažení a zároveň umožňuje porovnání různých tříd plechů. Popisuje ji norma ISO 20 482.

Průběh zkoušky spočívá v upnutí zkušební vzorku tvaru čtverce s rozměry 90×90 mm mezi tažnici a přidržovač. Dalším krokem je vtlačování tažníku, který má tvar koule průměru 20 mm. Tažník se rovnoměrným pohybem posouvá vpřed. Pohyb nástroje je zajištěn buď mechanickým (šroub) nebo hydraulickým způsobem. Posuv tažníku je ukončen v momentě kdy na vznikajícím vrchlíku vznikne první trhlinka v celé tloušťce. Výsledek testu je uveden jako maximální hloubka vniku tažníku do vzorku, přičemž jako nulová hloubka se bere první dotek se vzorkem. Tato hodnota se pak značí *IE* a je závislá na rychlosti vtlačování nástroje do vzorku.

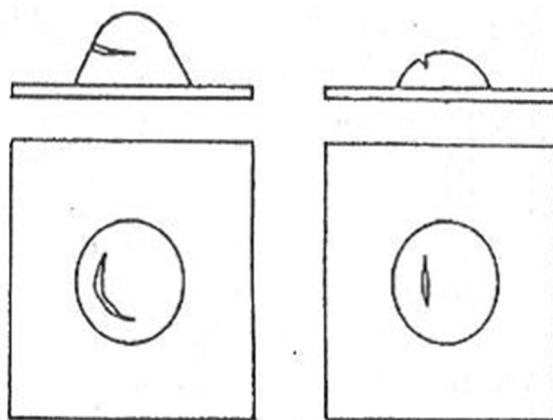
Princip zkoušky (včetně základních rozměrů nástrojů) je schematicky znázorněn na obr. 17, hodnota *h* odpovídá hodnotě *IE*. Obrázek 18 pak znázorňuje typy trhlin, které mohou vzniknout.

Výhodou této metody je její jednoduchost a snadná příprava zkušebních vzorků, avšak mezi nevýhody je třeba zahrnout fakt, že neudává bližší informace k mechanickým vlastnostem a anizotropii.

V dnešní době byly zkonstruovány speciální druhy nástrojů a měřících strojů určených pro Erichsenovu zkoušku, které zvládají z této zkoušky vyhodnotit i parametry jako je pevnost v tahu, tažnost apod. Okamžik vzniku trhliny bývá obvykle určen vizuálně, což způsobí nepřesnost. Z toho důvodu poskytují některé moderní přístroje i možnost laserového snímání zkušební vzorku včetně sledování postupného zužování v místě kde má trhlinka vzniknout.



Obr. 17 Schéma Erichsenovi zkoušky [26]



Obr. 18 Možné druhy trhlin
Vlevo – plechy určené pro hluboké tažení
Vpravo – plechy nevhodné pro hluboké tažení
[26]

4.2 Kalíšková zkouška (Schmiedtova) [5], [6], [14]

Kalíšková zkouška (Schmiedtova nebo též AEG zkouška) je určena k posouzení vhodnosti plechu pro hluboký tah.

Principem této zkoušky je vytažení kalíšku za pomoci přidržovače (viz obr. 19). Během zkoušky je postupně zvětšován průměr polotovaru (rondelu) až do dosažení největšího průměru polotovaru, který bude možné vytáhnout bez vzniku trhlin. Ze známého průměru tažníku $d_v = 50$ mm lze jednoduchou cestou stanovit velikost minimálního součinitele tažení m_{min} a rovněž taky stupeň tažení K pomocí vztahu:

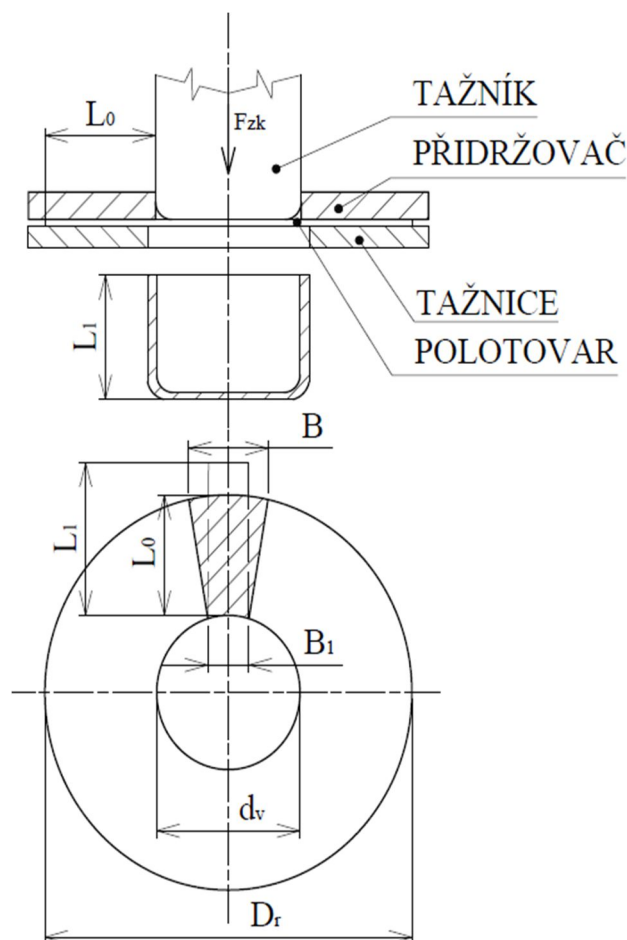
$$m_{min} = \frac{d_v}{D_r} = \frac{1}{K} [-] \quad (4.1)$$

Kde: d_v – průměr tažníku [mm]

D_r – průměr rondely [mm]

K – stupeň tažení [-]

Zkouška není příliš vhodná pro nesymetrické nerotační tvary. Kvůli neustálému provádění změn na polotovaru, je třeba vyrábět nové polotovary a z toho důvodu lze říci, že je rovněž časově náročná, avšak svým principem se velmi blíží k reálnému technologickému procesu. V porovnání s Erichsenovou zkouškou zde lze vyhodnotit anizotropii daného plechu, protože na výtažku vznikne tzv. „cípatost“. Příklad vzniku „cípatosti“ výtažku je uveden a obr. 20.



Obr. 19 Schéma kalíškové zkoušky [5]

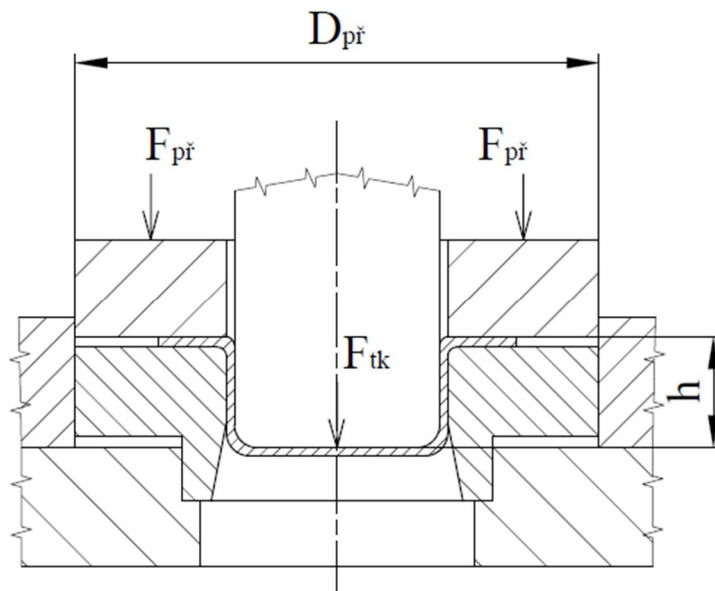


Obr. 20 Příklad „cípatosti“ rotačně symetrického výtažku [38]

4.3 Gross – Engelhardtova zkouška [5], [6]

Tato zkouška bývá taky často nazývána jako kalíšková zkouška s přidržením příruby. Do zkušebního přístroje se založí vzorek tenkého plechu o šířce 58 mm. V první fázi dochází k vystřížení polotovaru ze založeného plechu o průměru 52 mm. Následuje vytažení s přidržovačem dle obr. 21. Tažení probíhá až do překročení maximální tažné síly F_2 , přičemž v dalším kroku dojde k přitlačení přidržovače k přírubě. Při dalším pohybu tažníku dochází k utržení dna výtažku.

Výsledkem zkoušky je diagram závislosti tažné síly na dráze tažníku (viz obr. 22). Posouzení plechu probíhá na základě hodnoty stupně hlubokotažnosti T_{GE} (v procentech), který se vypočte ze vztahu:



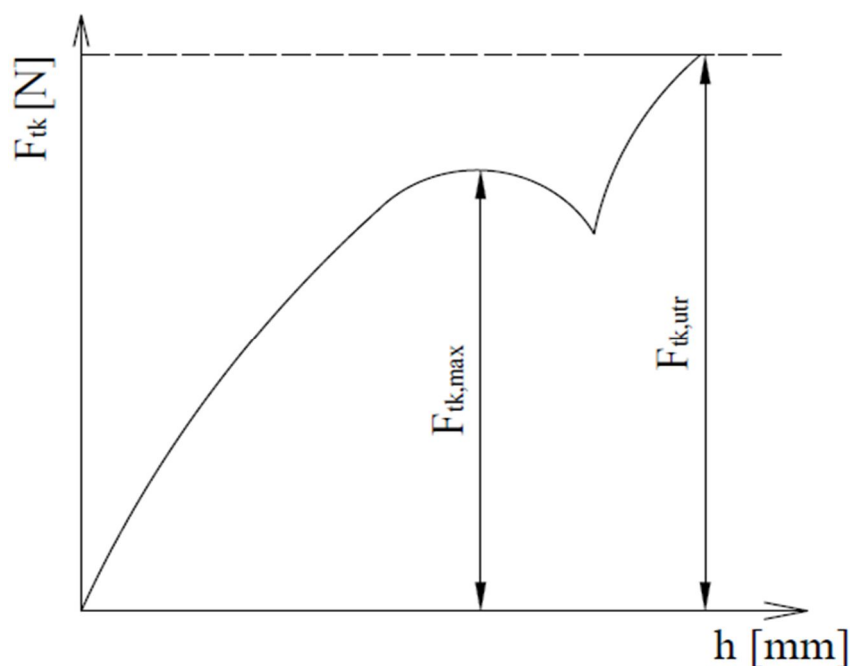
Obr. 21 Princip Gross - Engelhardtovi zkoušky [6]

$$T_{GE} = \frac{F_{tk,utr} - F_{tk,max}}{F_{tk,max}} \cdot 100 [\%] \quad (4.2)$$

Kde: $F_{tk,utr}$ – síla, které bylo dosaženo při utržení dna výtažku [N]

$F_{tk,max}$ – maximální tažná síla [N]

Jeho hodnota by se měla pohybovat nad 40 %.



Obr. 22 Závislost tažné síly na dráze nástroje [5]

4.4 Zkouška rozšiřováním otvoru (dle Siebela a Pompa) [5], [6], [12]

Zkouška je založena na vytáhnutí kalíškové součásti za použití přidržovače z polotovaru, který má tvar čtverce, v jehož středu je kruhový otvor průměru d_0 (viz obr. 23). Postupným vtahováním materiálu se zvyšuje hloubka t_{max} a zároveň se deformuje (zvětšuje) průměr d_0 , který je v porovnání s průměrem tažníku přibližně třetinový. Tažení probíhá za pomoci tažníku s rovným čelem až do okamžiku, kdy na obvodu díry vzniknou první praskliny. Rovné čelo tažníku by mělo být dobře mazáno. Konstrukce tažníku může být se středícím výstupkem nebo bez výstupku.

Ukazatelem tvařitelnosti plechu je:

- maximální hloubka t_{max}
- rozložení deformace průměru d_0 , které je závislé na plošné anizotropii materiálu a určí se ze vztahu (4.4).
- velikost deformace d' průměru d_0 , která se stanoví jako aritmetický průměr délky d'_{max} a d'_{min} ze vztahu:

$$d' = \frac{d'_{max} + d'_{min}}{2} \text{ [mm]} \quad (4.3)$$

Kde: d'_{max} – maximální prodloužení průměru d_0 [mm]

d'_{min} – minimální prodloužení průměru d_0 [mm]

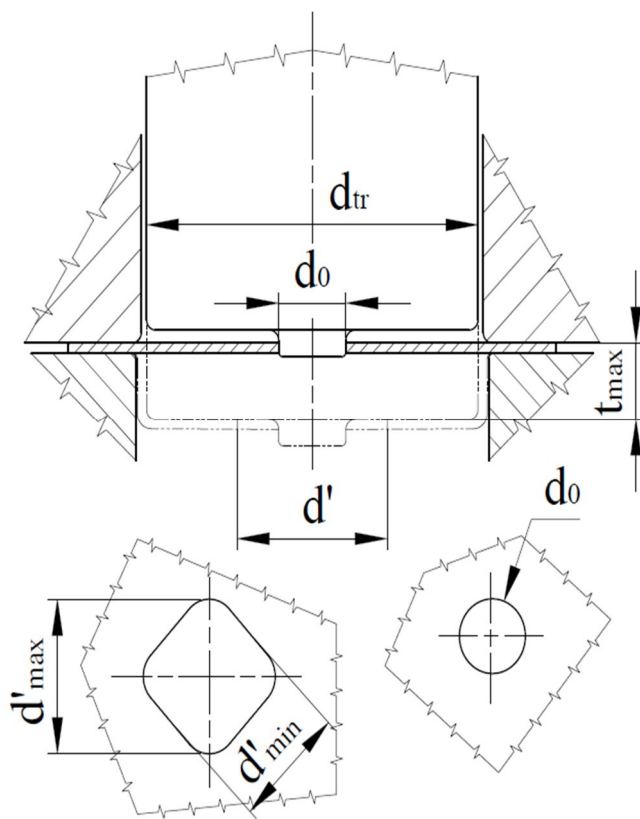
Nerovnoměrnost deformace:

$$N = \frac{d'_{max} + d'_{min}}{d'} \text{ [-]} \quad (4.4)$$

Lze tedy říci, že s rostoucí hodnotou hloubky t_{max} , velikostí deformace d' a se zmenšující se anizotropií je daný plech vhodnější pro hluboký tah.

Výsledek zkoušky bývá taky vyjádřen jednotným číslem q , které se stanoví vztahem:

$$q = \frac{t_{max} \cdot (d'_{max} + d'_{min})^2}{4 \cdot d_0 \cdot (d'_{max} - d'_{min})} \text{ [mm]} \quad (4.5)$$



Obr. 23 Princip zkoušky rozšiřování otvoru [5]

4.5 Fukuiho zkouška [5], [6], [12]

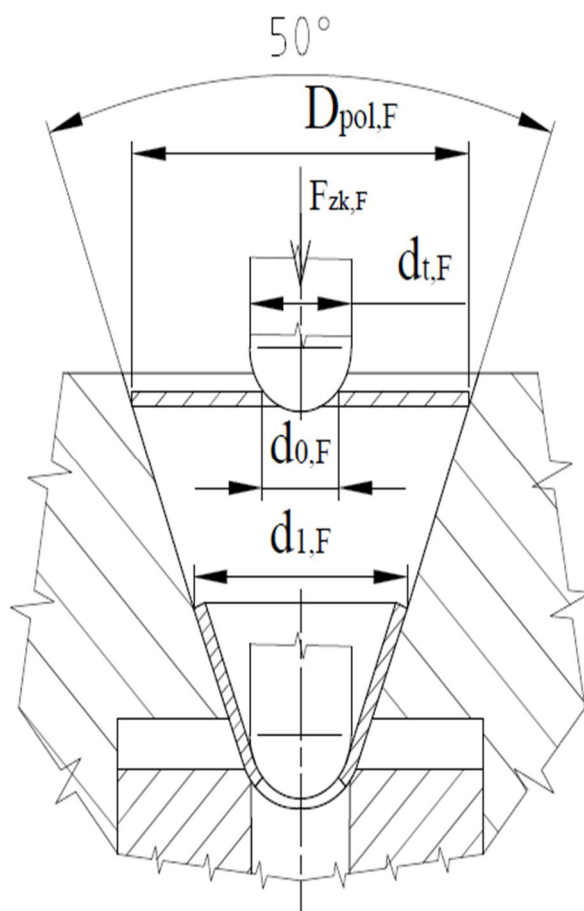
Fukuiho zkouška označována rovněž jako zkouška tažení v kuželové tažnici spočívá ve vytážení kuželového výtažku za pomoci kulovitého tažníku průměru $d_{t,F}$ v kuželové tažnici (viz obr. 24). Zkouška je ukončena v momentě vzniku trhliny v otvoru resp. ve dně výtažku (viz obr. 25). Polotovarem zde bývá kruhový rondel s kruhovou dírou uprostřed (nebo bez díry). Průměr polotovaru je obvykle šestkrát větší než průměr středové díry. Průměr tažníku $d_{t,F}$ se pohybuje v rozmezí 12,5 – 27 mm a je závislý na tloušťce plechu (nejčastěji dvojnásobek průměru středové díry $d_{0,F}$). Mazání bývá zajištěno pouze ze strany tažnice.

Výsledkem Fukuiho testu je získání součinitele hlubokotažnosti m_F , který je dán vztahem:

$$m_F = \frac{d_{1,F}}{D_{pol,F}} [-] \quad (4.6)$$

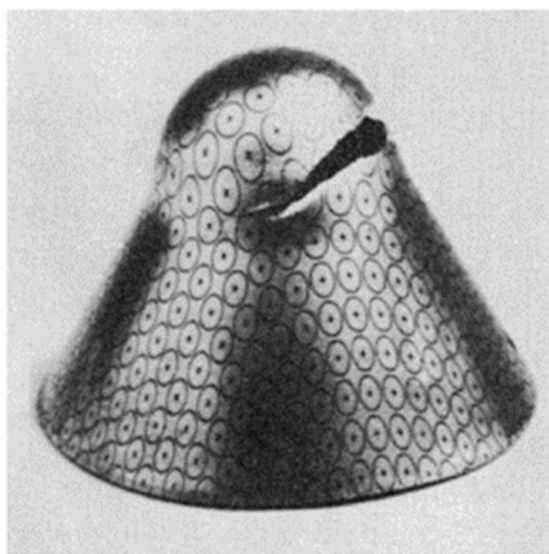
Kde: $d_{1,F}$ – největší průměr výtažku [mm]

$D_{pol,F}$ – průměr polotovaru [mm]



Obr. 24 Schéma Fukuiho zkoušky [6]

Hlubokotažné plechy se vyznačují nízkým součinitelem hlubokotažnosti, kterého bude dosaženo v případě, že největší průměr výtažku bude dosahovat výrazně menších hodnot než je průměr polotovaru.

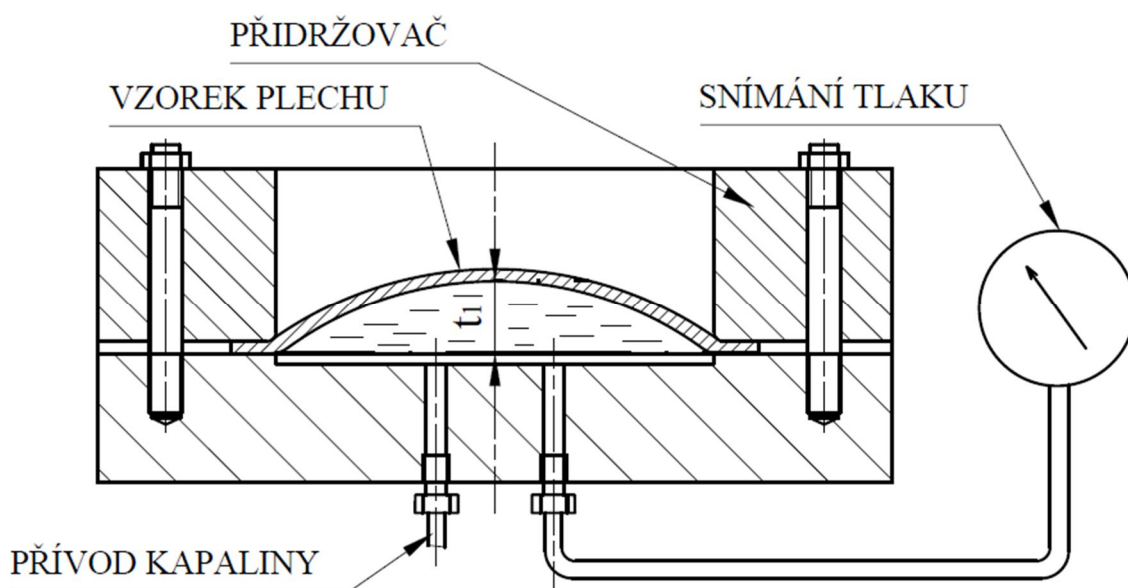


Obr. 25 Zkušební vzorek s nanesenou deformační sítí po provedení zkoušky [31]

4.6 Tomlenova zkouška (hydraulická) [5]

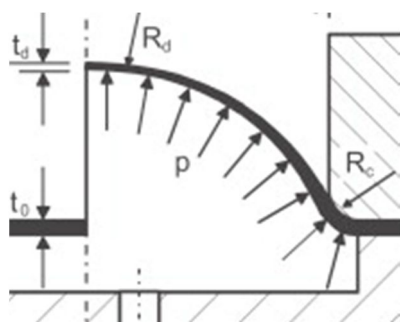
Zkouška je založena na vyboulování zkušební vzorku pomocí kapaliny (viz obr. 26). Plech se vloží na místo tomu určené a následně upne pomocí přídržovače s dírami pro šrouby. Utažením přídržovače je zajištěna těsnost celé sestavy. Po upnutí plechu se začne do prostoru pod plechem přivádět tlakové médium (kapalina), které způsobí vyboulení plechu. Tlak kapaliny je sledován pomocí připojeného manometru. Postupným zvyšováním tlaku kapaliny se plech ztenčuje (viz obr. 27). Zkouška je ukončena v momentě, kdy se objeví první prasklina.

Vyhodnocení zkoušky spočívá ve stanovení velikosti vyboulení t_l , kterého se dosáhne v momentě vzniku praskliny. Součástí zkoušky je i vyhodnocení deformovaného povrchu plechu včetně posouzení tvaru praskliny.



Obr. 26 Princip Tomlenovi zkoušky [5]

Ačkoliv je zařízení na Tomlenovu zkoušku složitější konstrukce s nároky na vysokou těsnost, je tato zkouška poměrně jednoduchá a rychlá. Při porovnání rozložení tlaku s jinou zkouškou je zřejmé, že při Tomlenově zkoušce působí tlak kapaliny rovnoměrně stejně na všech kontaktních plochách plechu s kapalinou. Ukázka zkušební vzorku po provedení zkoušky viz obr. 28.



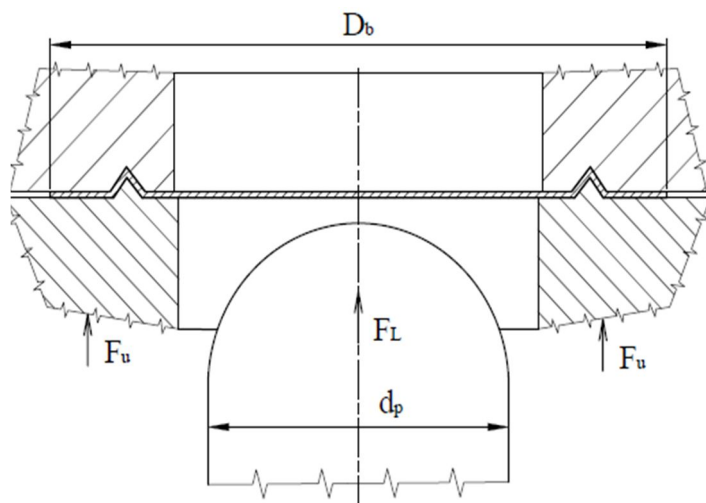
Obr. 27 Rozložení tlaku a ztenčení stěny [8]



Obr. 28 Zkušební vzorek po zkoušce [8]

4.7 Zkouška LDH/Nakajima [12], [39]

V angličtině je tato zkouška obvykle označována jako Limiting Dome Height Test. Jejím principem je tažení polotovaru upnutým za pomoci přidržovače a žeber, které brání, resp. zlepšují vtahování plechu (viz obr. 29). Tažník má kulový tvar s možnými průměry d_p 50,8; 70,2; 101,6 mm (nejčastěji 101,6 mm). Je tedy zřejmé, že se tato metoda používá pro sférické výtažky. Zkouška je ukončena při vzniku trhliny.

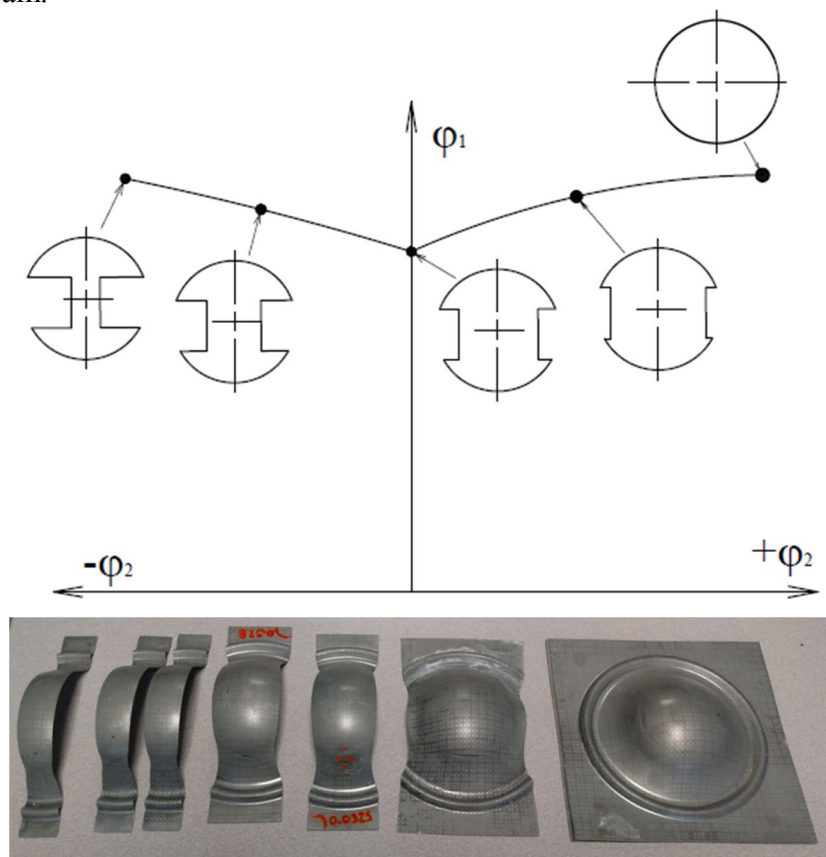


Výsledkem zkoušky může být:

- Maximální hloubka h_L při které dojde ke vzniku trhlin
- Mezní lomová křivka
- Diagram mezní tvařitelnosti

Obr. 29 Schéma LDH testu [12]

LDH zkoušky lze využít ke stanovení Keeler - Goodwinova diagramu. Provádí se s několika odlišnými tvary zkušebních vzorků (viz obr. 30). Každý z uvedených vzorků se se svou deformací pohybuje v určité oblasti diagramu. Při následné aproximaci pak lze získat zmíněný diagram.



Obr. 30 Tvary zkušebních vzorků pro různé oblasti diagramu [39]

4.8 Zkouška lámavosti [5], [6]

Zkouška lámavosti (dle ČSN 42 0401) se používá pro tlusté plechy. Zkušební vzorek je vložen na podpěry lámacího přípravku a zatěžován ohybníkem (viz obr. 31). K ukončení zkoušky dojde v momentě vzniku trhliny v místě ohybu (viz obr. 33).

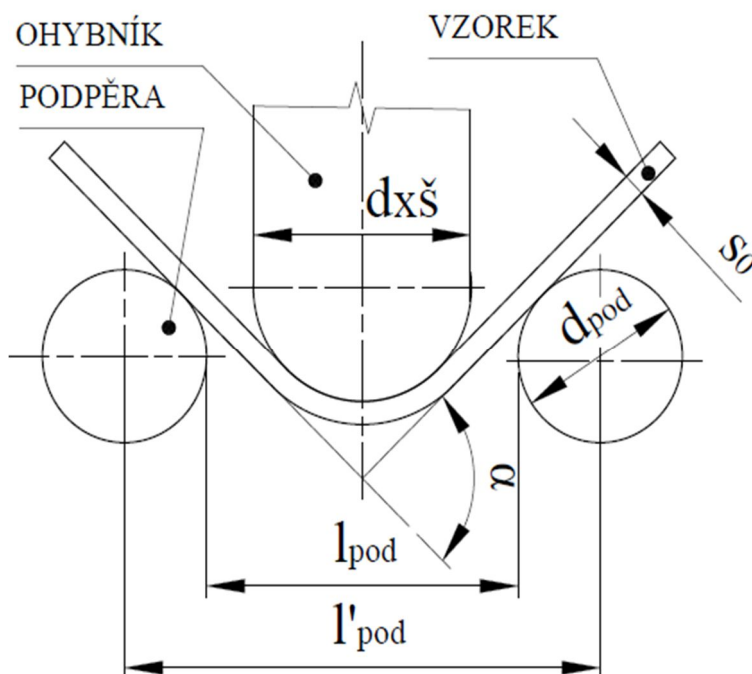
Plechový vzorek bývá dlouhý v rozmezí 200 až 400 mm a široký 25 až 50 mm, přičemž jeho odebrání z plechové tabule musí být dle normy ČSN 42 0335. Při odběru zkušebních vzorků je třeba brát ohled na směr válcování plechu.

Výhodou této zkoušky je poměrně jednoduchá konstrukce nástroje a nepotřebnost speciálního typu stroje. Lze ji tedy provést na běžných lisovacích strojích, které jsou schopny vyvinout dostatečně velkou sílu.

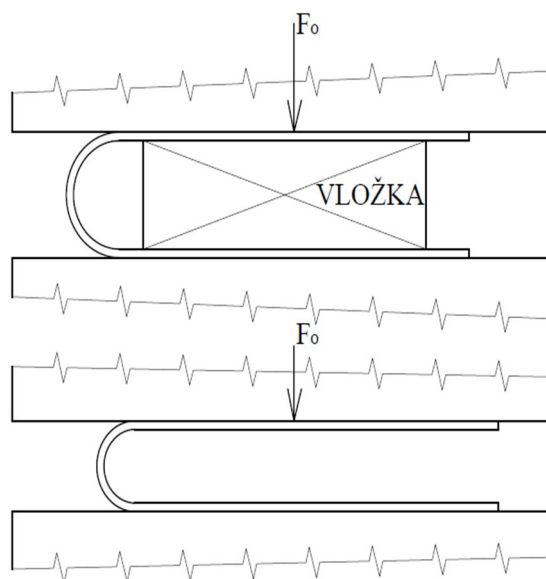
Výsledkem zkoušky lámavosti je stanovení velikosti úhlu ohybu, při kterém ještě nedochází ke vzniku prvních trhlin na povrchu materiálu.

Zkouška lámavosti nemusí

spočívat pouze v ohýbání přes trn do úhlu α jak zobrazuje obr. 31, ale lze ohýbat rovněž do 180° (ohýbaná ramena budou rovnoběžná – viz obr. 32).



Obr. 31 Schéma zkoušky lámavosti [5]



Obr. 32 Ohýbání do rovnoběžnosti ramen [6]



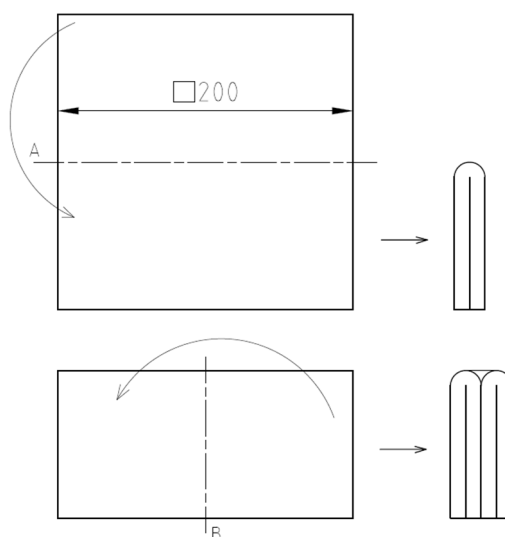
Obr. 33 Trhlina vzniklá ohybem [32]

4.9 Zkouška dvojitým ohybem [5]

Princip zkoušky dvojitým ohybem je poměrně jednoduchý. Vychází se ze zkušební vzorku tvaru čtverce 200×200 mm odebraného z tabule plechu vhodným způsobem. Vzorek se v prvním kroku ohne kolem osy A o 180° a následně kolem osy B stejným způsobem (viz obr. 34).

Kvalita plechu se následně posuzuje podle toho, zda v ohýbaných místech začnou vznikat trhliny.

Výhodou téhle zkoušky je její rychlost, jednoduchost a taky fakt, že není třeba žádného drahého a složitého ohýbacího zařízení.



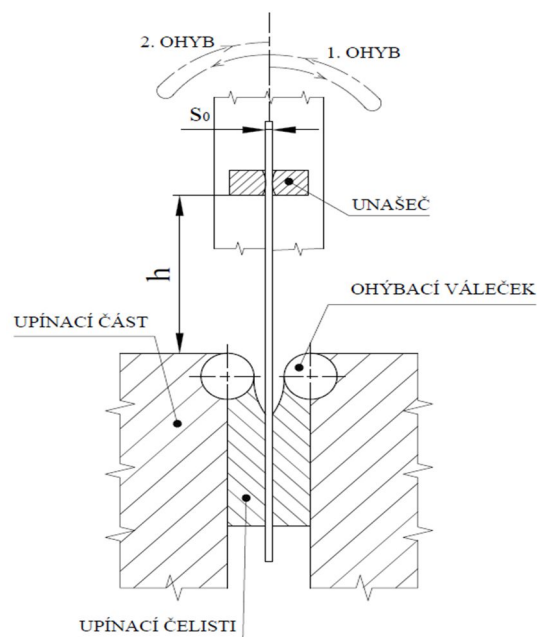
Obr. 34 Postup přehýbání plechu [5]

4.10 Zkouška střídavým ohybem [5]

Princip zkoušky střídavým ohybem spočívá v ohýbání plechu až do vzniku lomu. Zkoušený plechový vzorek o obvyklé šířce 20 mm a délce 100 mm se z jedné strany upne do upínacích čelistí a z druhé strany do unašeče připevněného k páce (viz obr. 35). Následuje plynulé ohýbání kolem ohýbacích válečků přesně daného poloměru dle naznačeného schématu (do 60 ohybů/min), přičemž úhel každého ohybu je 90° . Vzdálenost upínací části od unašeče se volí dle tloušťky plechu a poloměru přes který je vzorek ohýbán (dle ČSN ISO 7799 je $h = 25 - 50$ mm).

Zkouška je ukončena ulomením plechu tzn. dosažením meze únavy materiálu.

Plech o nižší tloušťce je možné předepnout určitým malým napětím.

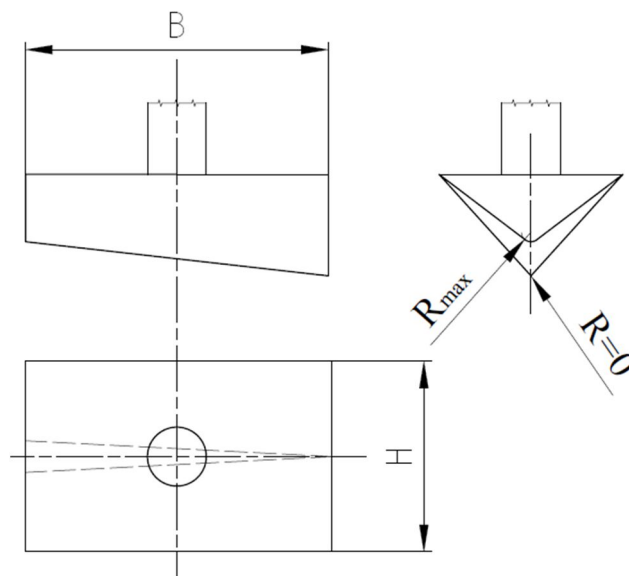


Obr. 35 Schéma zkoušky střídavým ohybem [5]

4.11 Zkouška dle Gütha [5]

Jedná se o zkoušku, která se provádí v ohýbacím nástroji. Poloměr ohybníku dosahuje hodnot od nuly do maximální velikosti (viz obr. 36). Zkušební vzorek se vloží do ohýbacího nástroje a následně je plynule ohýbán.

Výsledkem zkoušky je stanovení poloměru, při kterém dochází ke vzniku trhlin v namáhaném místě ohybu. Zkouška podle Gütha tedy udává hodnotu minimálního poloměru ohybu, kterého lze dosáhnout na plechu o dané tloušťce a materiálu.



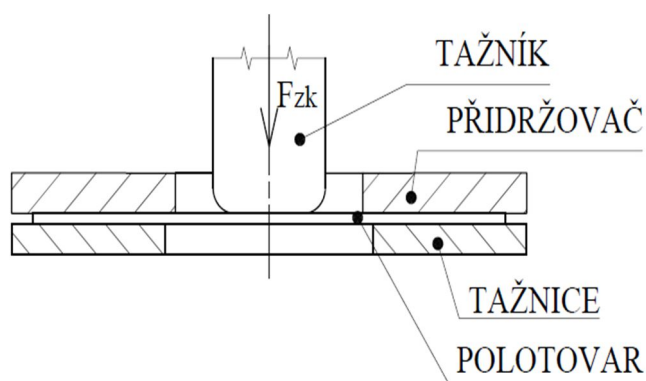
Obr. 36 Zkušební ohybník [5]

4.12 Zkouška zvlnění [12]

Zkouška zvlnění se v široké míře podobá zkoušce kalíškové. Rozdíl těchto dvou zkoušek však spočívá ve výrazně menším průměru tažníku (přibližně o čtvrtinu). Polotovar je vložen mezi tažnici a přidržovač, který jej sevře (viz obr. 37). Následuje proces tažení. Protože průměr tažníku je výrazně menší, dochází ke vzniku kuželovitého výtažku, jelikož stěna výtažku není v kontaktu s tažníkem.

U této zkoušky je možné vyvolat dvě varianty zvlnění. V případě, že přidržovací síla nebude dosahovat vyšších hodnot, budou vlny vznikat v přírubě výtažku. Při vyvození vyšší přidržovací síly začnou vlny vznikat v důsledku menšího tažníku ve stěně výtažku.

Závislost tažené hloubky na přidržovací síle viz obr. 38.



Obr. 37 Schéma zkoušky zvlnění [12]

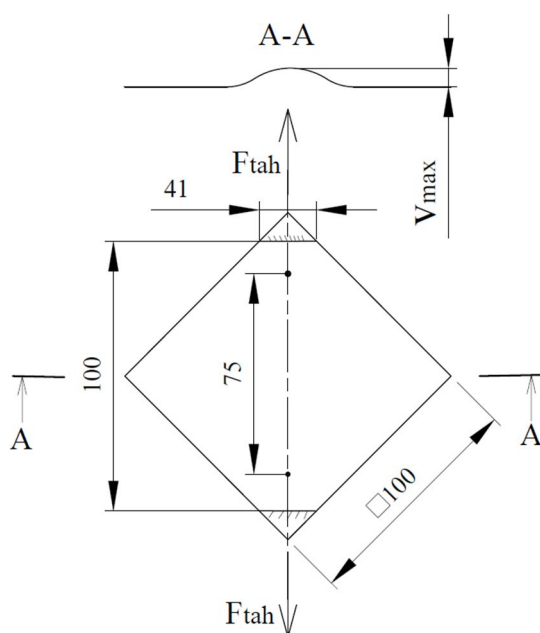


Obr. 38 Závislost tažené hloubky na přidržovací síle [12]

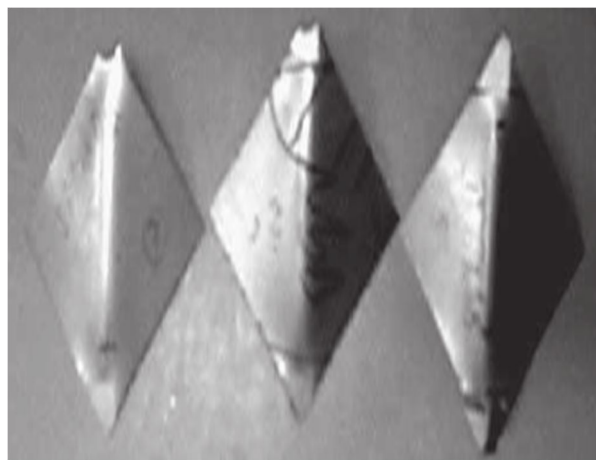
4.13 Zkouška vybočením [12]

Zkouška vybočením se svou podstatou podobá běžné zkoušce tahem. Zkušební vzorek tvaru čtverce o standardních rozměrech 100×100 mm (nebo jiné) je upnut za dva úhlopříčně protilehlé rohy. Následně je napínán tahovou silou (viz obr. 39).

Výsledkem zkoušky je zjištění maximálního vybočení (v_{max}) plechu v rozsahu vyhodnocované délky, která činí 75 mm.



Obr. 39 Schéma zkoušky vybočením [12]



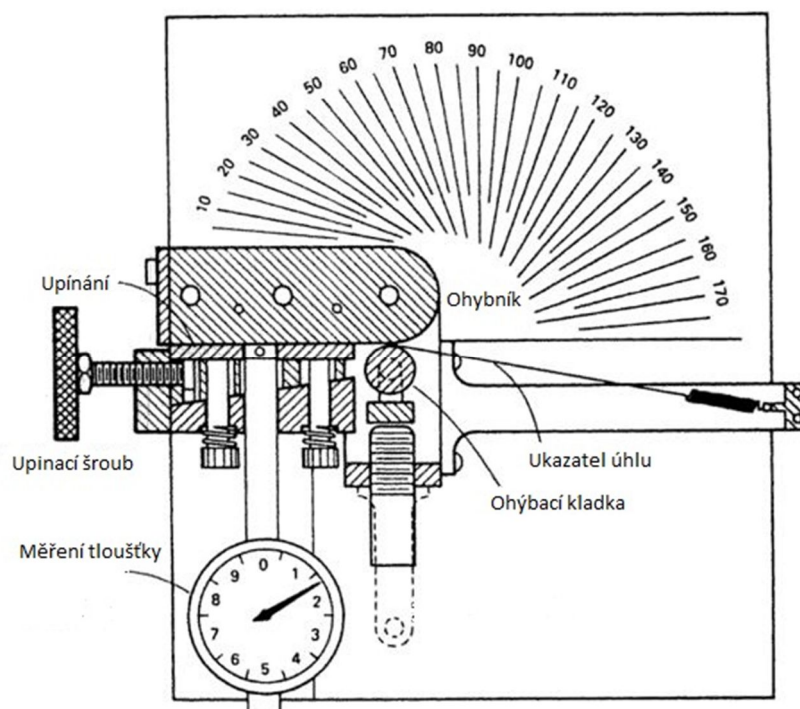
Obr. 40 Zkušební vzorky po zkoušce [3]

4.13 Zkouška odpružení [5], [12]

Během procesu ohýbání, bývá často nežádoucím jevem odpružení materiálu po odlehčení. Odpružení je způsobeno určitou mírou elastické deformace, která se v plechu nachází. Z toho důvodu se plechy zkouší na míru odpružení.

Zkouška odpružení spočívá v upnutí plechového vzorku (pásku) o dané tloušťce mezi upínací příložky a ohybník (viz obr. 41). Následuje ohnutí kolem ohybníku (s možnou výměnou poloměrů ohybu) o určitou velikost úhlu. Následným odlehčením lze pomocí ukazatele úhlu změřit míru odpružení na stupnici.

Výsledkem zkoušky je stanovení úhlu, o který se plech vrátí zpět. Na základě naměřených úhlů odpružení, tloušťky plechu a velikosti poloměru ohybu, lze vytvořit skupiny diagramů a tabulek, které pak mohou být jako pomůcka pro dělníka v provozu, který během ohýbání zvýší úhel ohybu právě o hodnotu odpružení (v případě volného ohýbání).



Obr. 41 Schéma ohýbacího zařízení [12]

Odpružení plechu lze rovněž přibližně určit výpočtem dle vztahů pro ohyb do tvaru U nebo V:

$$\text{Pro ohyb V: } \tan \beta = 0,375 \cdot \frac{l_v}{k_o \cdot s} \cdot \frac{Re}{E} \quad (4.7)$$

$$\text{Pro ohyb U: } \tan \beta = 0,75 \cdot \frac{l_u}{k_o \cdot s} \cdot \frac{Re}{E} \quad (4.8)$$

Kde: l_v – vzdálenost ohýbacích hran [mm]

l_u – rameno ohybu [mm]

E – modul pružnosti v tahu [MPa]

k_o – součinitel posunu neutrální osy [-]

s – tloušťka plechu [mm]

$Re/R_{p0,2}$ – mez kluzu materiálu [MPa]

β – úhel odpružení [°]

5 EXPERIMENT - ERICHSENOVA ZKOUŠKA

Zkouška hloubení podle Erichsena byla provedena na základě poskytnutí tří vzorků karosářských plechů (viz příloha 1) od firmy Kovovýroba Hoffmann s. r. o. Zkušební vzorky byly dodány o předepsané velikosti 90 x 90 mm.

Zkoušené materiály: DC06+ZE (0,7 mm)

CR340LA+GI/GA50-U (1,2 mm)

CR300LA+GI/GA50-U (1,4 mm)

Místo provedení zkoušky: Vysoké učení technické v Brně

Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Odbor technologie tváření kovů a plastů

Údaje o měřicím přístroji:

Výrobce: AP-OSTROW

Typ: F-4

Na kalibraci uzavřena smlouva s ČMI Brno
pod číslem 0100-SM-N138-07 z r. 2007

5.1 Vyhodnocení vzorků [21]

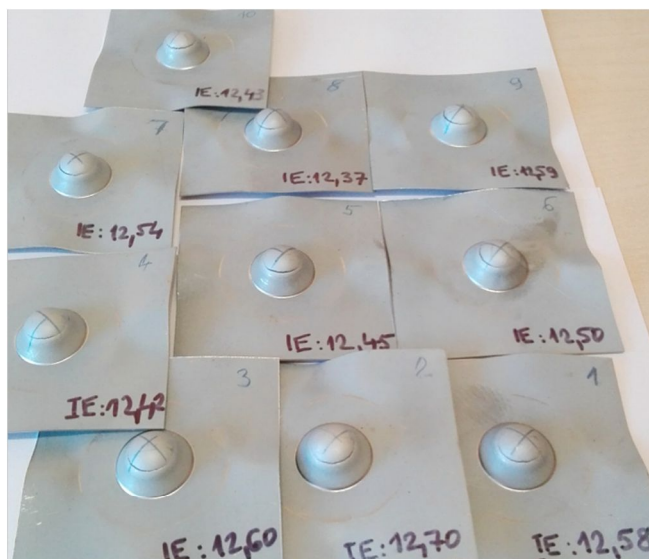
Vzorek plechu DC06+ZE (0,7 mm)

Plech DC06+ZE je z nízkouhlíkové oceli určené pro tváření za studena s vysokou jakostí povlakové vrstvy s elektrolytickým pozinkováním. Chemické složení a mechanické vlastnosti viz příloha 1.

Experiment byl proveden na deseti vzorcích o již zmiňovaných rozměrech. Vzhled vzorků po provedení zkoušky viz obr. 42. Hodnoty zjištěné Erichsenovou zkouškou znázorňuje tab. 1. Z těchto hodnot byl sestaven graf 1.

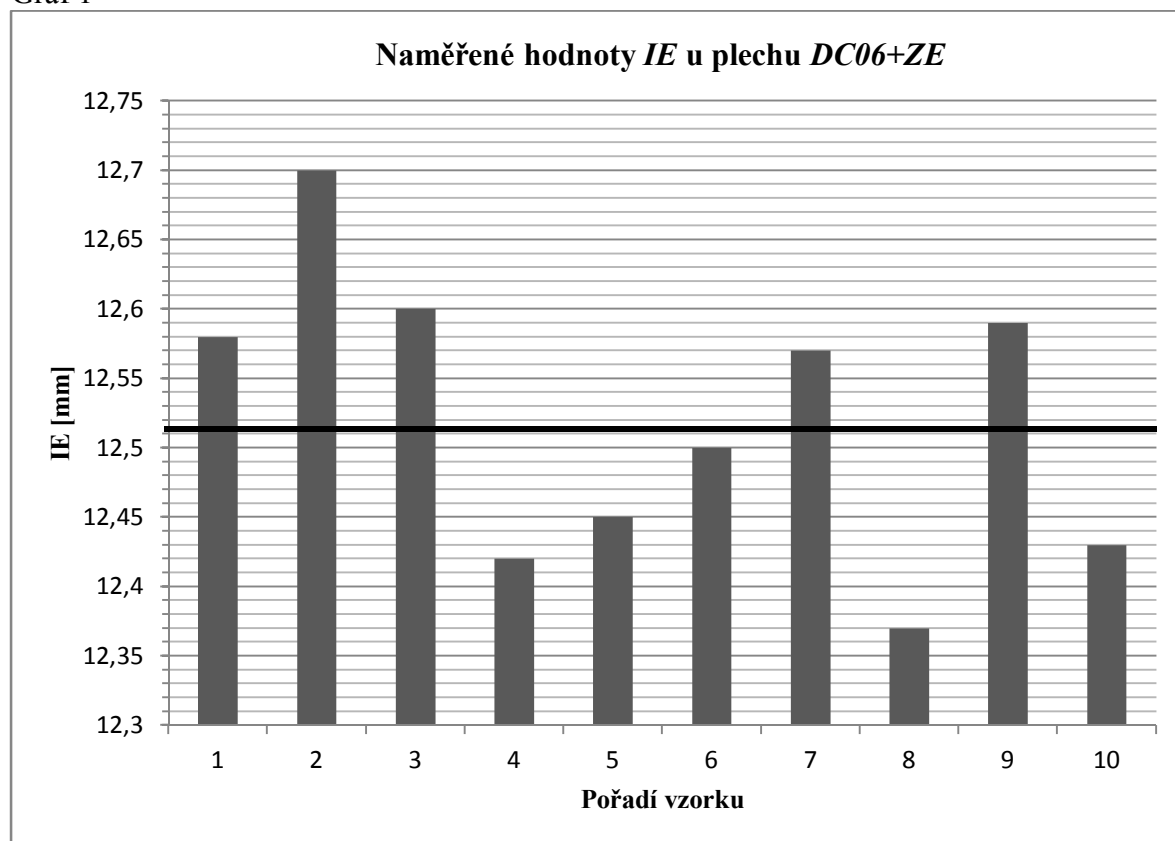
Tab. 1 Zjištěné hodnoty hloubky IE

p. č.	IE [mm]
1.	12,58
2.	12,70
3.	12,60
4.	12,42
5.	12,45
6.	12,50
7.	12,57
8.	12,37
9.	12,59
10.	12,43



Obr. 42 Fotografie vzorků 0,7 mm DC06+ZE po zkoušce

Graf 1



Stanovení směrodatné odchyly:

Tab. 2 Výpočet směrodatné odchyly

p. č.	IE [mm]	\overline{IE} [mm]	$(IE - \overline{IE})$ [mm]	$(IE - \overline{IE})^2$ [mm ²]
1	12,58	12,52	0,06	0,0036
2	12,70		0,18	0,0324
3	12,60		0,08	0,0064
4	12,42		-0,10	0,0100
5	12,45		-0,07	0,0049
6	12,50		-0,02	0,0004
7	12,57		0,05	0,0025
8	12,37		-0,15	0,0225
9	12,59		0,07	0,0049
10	12,43		-0,09	0,0081
			$\Sigma(IE_i - \overline{IE})^2$	0,0957
Směrodatná odchylka [mm]			0,10	

Statisticky zpracovaná data v tab. 2 byla vypočtena pomocí následujících vztahů:
Průměrná hodnota \overline{IE} :

$$\overline{IE} = \frac{1}{n_m} \cdot \sum_{i=1}^{n_m} IE_i \quad [\text{mm}] \quad (5.1)$$

Kde: IE_i – i-tá hodnota naměřené hloubky [mm]

n_m – počet měření [-]

Směrodatná odchylka s :

$$s = \sqrt{\frac{1}{n_m - 1} \sum_1^{n_m} (IE_i - \overline{IE})^2} \text{ [mm]} \quad (5.2)$$

Rozpětí hloubek r_{IE} :

$$r_{IE} = IE_{max} - IE_{min} \text{ [mm]} \quad (5.3)$$

Kde: IE_{max} – maximální naměřená hloubka [mm]
 IE_{min} – minimální naměřená hloubka [mm]

$$r_{IE} = 12,70 - 12,37 = 0,33 \text{ mm}$$

Směrodatná odchylka byla stanovena metodou nejmenších čtverců na 0,10 mm (kontrola pomocí MS Excel - vypočtená směrodatná odchylka dosahovala hodnoty 0,097) a rozpětí hloubek na 0,33 mm.

Vzorek plechu CR340LA+GI/GA50-U (1,2 mm)

Daný plech je z mikrolegované oceli s vysokou mezí kluzu, žárově zinkovaný, určený k tváření za studena.

Ocel lze zařadit mezi titan-niobdové mikrolegované oceli. Titan zde prohlubuje účinek niobu. Chemické složení a mechanické vlastnosti viz příloha 1.

S ohledem na vysokou mez kluzu a vysokou mez pevnosti plechu byl vyhodnocen pouze jeden vzorek, protože zkušební stroj je limitován mezí pevnosti $R_m = 600$ MPa. Vzhled vzorku po provedení zkoušky viz obr. 43.



Obr. 43 Fotografie vzorku 1,2 mm CR340LA+GI/GA50-U po zkoušce

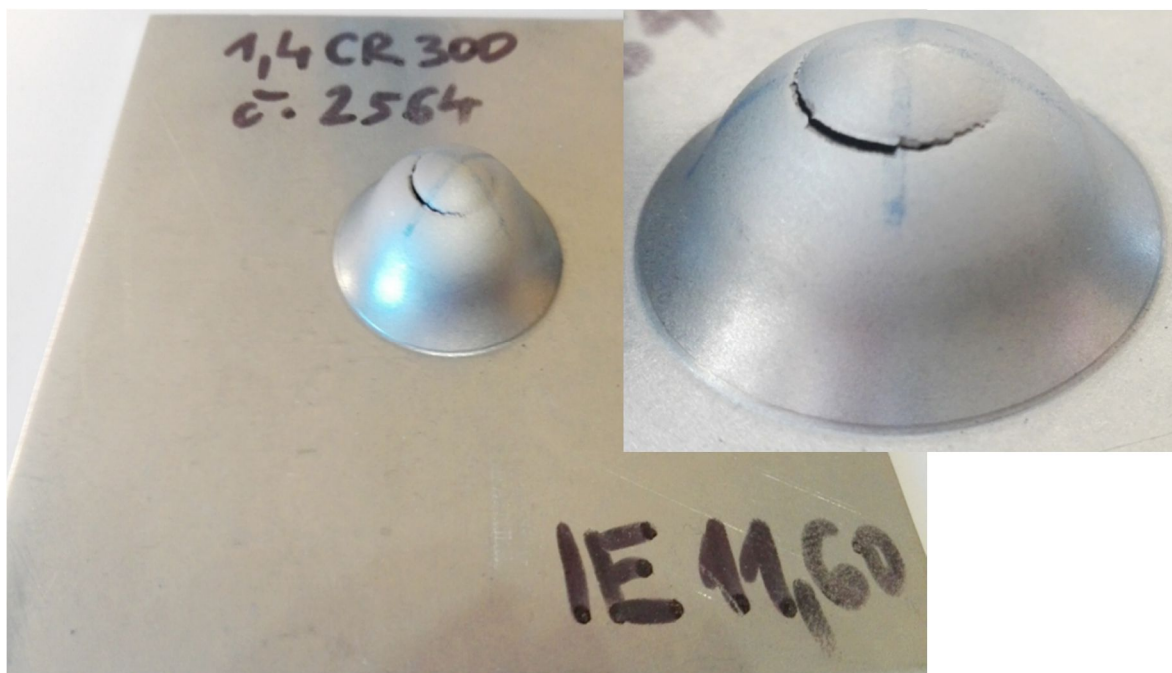
Při zkoušce bylo dosaženo hodnoty hloubky $IE = 10,95$ mm.

Vzorek plechu CR300LA+GI/GA50-U (1,4 mm)

Plech je vyroben z mikrolegované oceli s vysokou mezí kluzu, žárově zinkovaný, určený k tváření za studena.

Materiál je mikrolegován titanem, niobem, bórem a vanadem. Chemické složení a mechanické vlastnosti viz příloha 1.

Podobně jako v předchozím případě musel být s ohledem na možnosti zkušebního stroje zhotoven pouze jeden zkušební vzorek. Vzhled vzorku po provedení zkoušky viz obr. 44.



Obr. 44 Fotografie vzorku 1,4 mm CR300LA+GI/GA50-U po zkoušce

Při zkoušce bylo dosaženo hodnoty hloubky $IE = 11,60$ mm.

5.2 Návrh přípravku pro zkoušení velmi tenkých a malých vzorků

S ohledem na problematiku zkoušení velmi tenkých plechů, byl navržen jednoduchý přípravek pro zkoušku dle Erichsena. Přípravek bude vyroben z materiálů a polotovarů běžně dostupných na trhu tak, aby byl nejen jednoduchý na výrobu, ale rovněž vyrobitelný svépomocí. Při konstrukci bylo rovněž bráno v potaz, že ne každá firma si chce pořizovat profesionální měřicí přístroj pro Erichsenovu zkoušku.

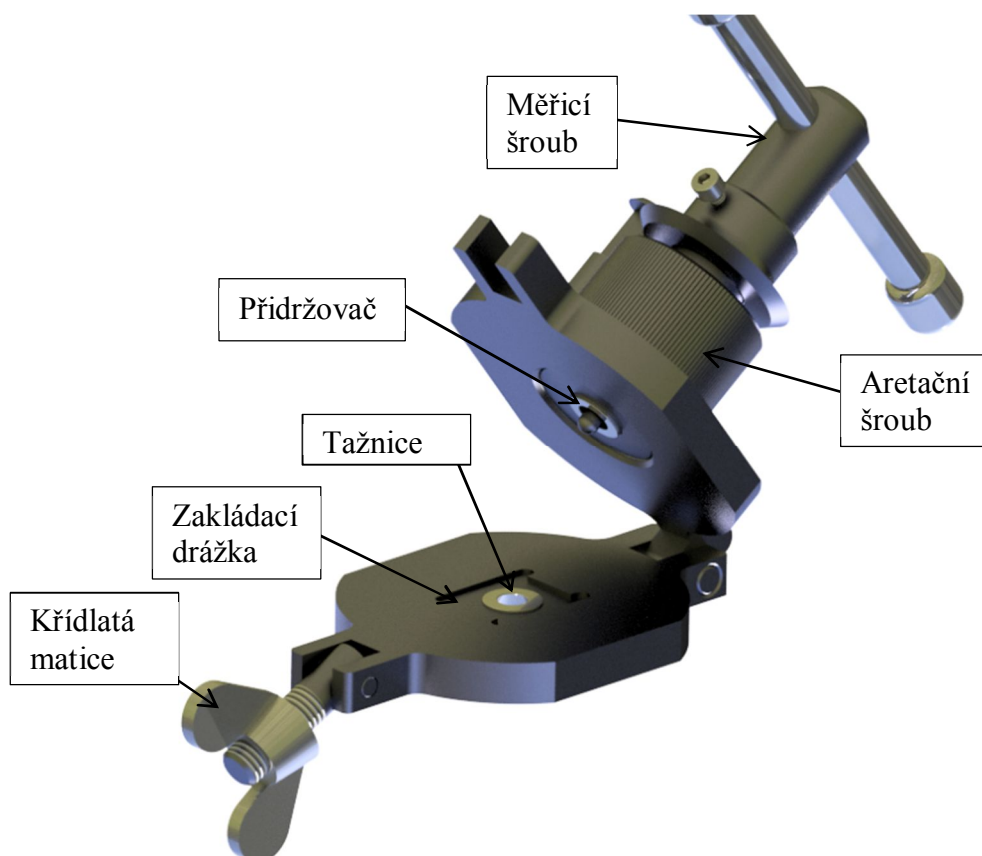
Do přípravku se budou vkládat vzorky 22,5 x 22,5 mm s tloušťkou do 0,4 mm. Přípravek je tedy navržen především pro zkoušení obalových resp. velmi tenkých plechů. Ve srovnání s běžným přístrojem pro tento typ zkoušky byly navržené nástroje 4x zmenšeny. Tažník zde má tedy průměr 5 mm. Normalizované díly byly zvoleny z knihoven programu Autodesk Inventor Professional 2017.

Vyvozování tažné síly je za pomoci šroubu, který se šroubuje ručně. Přípravek je možné upnout do svěráku pro lepší stabilitu. Pozorování vzniku trhliny bude ze spodní strany přípravku (obr. 47), což umožňuje sledování taženého vrchlíku ze všech stran. Měření hloubky IE bude pomocí stupnice, jak zobrazuje obr. 46. Celá sestava je dobře přenosná svými rozměry a hmotností přibližně 1,4 kg. Tažná síla byla uvažována do 1 000 N, aby nevznikal příliš velký tlak v závitech a rovněž, aby byla možná pouze ruční obsluha.

Výkresová dokumentace viz příložené výkresy.

Postup měření na přípravku:

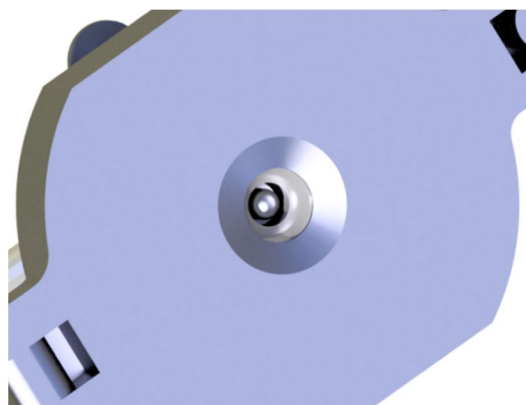
- Otevření a vložení zkušební vzorku do zakládací drážky (obr. 45)
- Zavření a utažení přípravku pomocí křídlaté matice (zajišťuje i vystředění)
- Sevření vzorku mezi tažnici a přidržovač pomocí aretačního šroubu
- Zašroubování měřicího šroubu do kontaktu s plechem
- Doražení čela měřicího kotouče na čelo osazení měrky a utažení
- Upnutí např. do svěráku za rovinné plochy
- Plynulé šroubování tažníku do zkoušeného materiálu v otočené poloze



Obr. 45 Otevřený přípravek



Obr. 46 Ukázka měření hloubky IE



Obr. 47 Pohled ze strany pozorování

5 ZÁVĚRY

Výsledkem bakalářské práce je vypracování rámcového přehledu zkoušek plechů využívajících se ve strojírenské praxi. Teoretická část práce byla doplněna o základní seznámení s tvářením, vyhodnocováním tvařitelnosti plechů a rovněž uvedením požadavků, které se na tyto materiály kladou.

Druhá část (praktická) byla věnována vyhodnocení zkoušky hloubením podle Erichsena na vzorcích karosářských plechů poskytnutých od firmy Kovovýroba Hoffmann s. r. o..

Na vzorku č. 1 z vysoce jakostního plechu *DC06+ZE* (tloušťka 0,7 mm) byla zjištěna průměrná hodnota hloubení $IE = 12,52$ mm. Zkouška byla provedena na deseti vzorcích, přičemž z naměřených dat byla následně stanovena směrodatná odchylka $s = 0,10$ mm a rozpětí hloubek $r_{IE} = 0,33$ mm.

Vzorek č. 2 byl z nízkolegovaného plechu *CR340LA+GI/GA50-U* (tloušťka 1,2 mm). Hodnota hloubení zde činila $IE = 10,95$ mm.

Vzorek č. 3 byl rovněž z nízkolegovaného plechu *CR300LA+GI/GA50-U* (tloušťka 1,4 mm). Naměřená hodnota IE byla stanovena na $IE = 11,60$ mm. Měření pro vzorky č. 2 a 3 bylo provedeno pouze na jednom vzorku s ohledem na možnosti měřicího přístroje, který je limitován pevností zkoušeného vzorku $R_m = 600$ MPa.

Z výsledků je zřejmé, že všechny tři druhy plechů jsou vhodné ke tváření za studena což splňuje informace od dodavatele. Tuto skutečnost je možné pozorovat na druzích trhlin, které při zkoušce vznikly. Trhliny na všech vzorcích měly tvar typický pro plechy s dobrou tvařitelností.

Poslední část práce pojednává o návrhu přípravku pro zkoušení velmi tenkých a malých vzorků. Přípravek byl navržen aby byl přenosný a univerzální. Průměr tažníku zde byl navržen na 5 mm.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [4]

1. ALTAN, Taylan. a A. Erman. TEKKAYA. *Sheet metal forming*. Materials Park, Oh: ASM International, 2012. ISBN 16-150-3842-6.
2. BAČA, Jozef, Jozef BÍLIK a Viktor TITTEL. *Technológia tvárnenia*. Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2010. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 978-80-227-3242-0.
3. BAYRAKTAR, E., N. ISAC a G. ARNOLD. Buckling limit diagrams (BLDs) of interstitial free steels (IFS): Comparison of experimental and finite element analysis. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005, **164-165**, 1487-1494. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.02.173. ISSN 09240136. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013605001573>
4. CITACE PRO. *Generátor citací* [online]. 2013 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/info>
5. DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. Vyd. 5., V Akademickém nakladatelství CERM 3. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-214-4747-9.
6. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
7. HYAN, Tom. Karoserie & podvozek – Dlouhá cesta. *Automobil* [online]. 2013 [cit. 2017-02-17]. Dostupné z: http://www.automobilrevue.cz/rubriky/automobily/technika/karoserie-podvozek-dlouha-cesta_42039.html
8. KAYA, S., T. ALTAN, P. GROCHE a C. KLÖPSCH. Determination of the flow stress of magnesium AZ31-O sheet at elevated temperatures using the hydraulic bulge test. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2008, **48**(5), 550-557 [cit. 2017-03-18]. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2007.06.011. ISSN 08906955. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695507001484>
9. KOCÁŇDA, A. a C. JASIŃSKI. Extended evaluation of Erichsen cupping test results by means of laser speckle. *Archives of Civil* [online]. 2016, **16**(2), 211-216 [cit. 2017-02-24]. DOI: 10.1016/j.acme.2015.10.007. ISSN 16449665. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S1644966515000965>
10. LEINVEBER, Jan, Jaroslav ŘASA a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky*. 3. dopl. vyd. Praha: Scientia, 1999. ISBN 80-718-3164-6.
11. SMRŽ, Peter. *Diagramy tvaritelnosti a jejich využití v praxi* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2011 [cit. 2017-03-27]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/17728>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Kamil Podaný.

12. THEIS, Henry E. *Handbook of metalforming processes* [online]. New York: Marcel Dekker, c1999 [cit. 2017-05-11]. ISBN 08-247-9317-X. Dostupné z:
https://books.google.cz/books?id=jNpv_RQKDc0C&printsec=copyright&hl=cs&source=gbs_pub_info_r#v=onepage&q&f=false
13. VOJTĚCH, Dalibor. *Materiály a jejich mezní stavy*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2010. ISBN 978-80-7080-741-5.
14. Katedra strojírenské technologie Technické univerzity v Liberci. *Technologie II* [online]. TU v Liberci [cit. 2017-02-17]. Dostupné z:
http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm
15. Obrazová příloha k cvičení z technologie tváření kovů a plastů. *Katedra strojírenské technologie: Technické univerzity v Liberci* [online]. Liberec [cit. 2017-02-20]. Dostupné z:
http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/tpk/2.pdf
16. Chromovaná nádrž ČZ: Uchytenie na silentbloky. *Veterandiely.sk* [online]. [cit. 2017-02-22]. Dostupné z: <https://www.veterandiely.sk/eshop/druh-tovaru/nadrze/chromovana-nadrz-cz-470-473-475-detail>
17. Hliník přírodní svitek: 0,63 x 1000 mm. *Aluminium shop* [online]. [cit. 2017-02-26]. Dostupné z: <http://www.aluminiumshop.cz/?i=532/0-63-x-1000-mm-hlinik-prirodni-svitek#>
18. Zkouška tvrdosti dle Vickerse: ČSN 42 0374. *Converter* [online]. 2002 [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/jednotky/tvrdest-vickers.htm>
19. Material Matters: Knowing your limit: The Formability of sheet metals. *Autoform Blog* [online]. [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: <http://www.autoform.com/blog/material-matters-knowing-your-limit/>
20. High strength low alloy (HSLA) steels for cold forming: High yield and tensile strength steels. *ArcelorMittal* [online]. [cit. 2017-03-24]. Dostupné z:
http://automotive.arcelormittal.com/saturnus/sheets/F_EN.html
21. Směrodatná odchylka. *Matematika* [online]. Nová média, s. r. o. © 2006—2014 [cit. 2017-04-08]. Dostupné z: <http://www.matematika.cz/smerodatna-odchylka>
22. Kapitola 1 - Co je ocel? *Projekt populár: Ocelový svět* [online]. COMTES FHT [cit. 2017-02-19]. Dostupné z: <http://ebook.veda-hrou.cz/cms/10-kapitola-1-co-je-ocel.html>
23. Chromování. *Super-chrom* [online]. [cit. 2017-02-22]. Dostupné z:
<http://www.superchrom.cz/chromovani-super-chrom-cz/>
24. Plechy za studena. *Davi steel CZ: Daniel & Victor Steel company* [online]. Brno [cit. 2017-02-26]. Dostupné z: <http://www.davisteel.cz/nabidka-plechu/plechy-za-studena/>
25. *Vlastnosti kovových materiálů a jejich zkoušení* [online]. [cit. 2017-03-11]. Dostupné z:
<http://jhamernik.sweb.cz/vlastnosti.htm>
26. Zkouška hlubokotažnosti. *Eluc: Elektronická učebnice* [online]. Olomouc [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1568>

27. Vysoce pevné mikrolegované oceli: High Strength Low Alloy Steels HSLA. *Západočeská univerzita v Plzni: Oddělení povrchového inženýrství* [online]. Plzeň [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: <https://www.opi.zcu.cz/hsla.pdf>
28. Pozinkované plechy. *Dekmetal: Fasádní a střešní systémy z plechu* [online]. [cit. 2017-02-22]. Dostupné z: <https://dekmetal.cz/fasadni-systemy/materialy/pozinkovane-plechy>
29. Statické zkoušky: Zkouška tahem. *Západočeská univerzita v Plzni* [online]. Plzeň [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~dyxon/DATA/Nauka%20o%20M/Zkouska.pdf>
30. Zkouška tvrdosti dle Rockwella: ČSN 42 0373. *Converter* [online]. 2002 [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/jednotky/tvrdost-rockwell.htm>
31. Chapter 18: Formability Tests: 18.1 CUPPING TESTS. *Engineering 360: Powered by IEEE GlobalSpec* [online]. 2007 [cit. 2017-03-17]. Dostupné z: <http://www.globalspec.com/reference/70327/203279/chapter-18-formability-tests>
32. Bend Test. *AGM CON-TEST* [online]. [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: <http://www.agmcontest.com/bend-test>
33. Nauka o materiálu: Struktura a vlastnosti materiálů a jejich zkoušení. *Ústav materiálového inženýrství: České Vysoké učení technické v Praze - Fakulta strojní* [online]. [cit. 2017-03-27]. Dostupné z: http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/3-5_technologicke-vlastnosti.pdf
34. Argus. *MCAE Systems* [online]. [cit. 2017-02-18]. Dostupné z: <http://www.mcae.cz/argus>
35. Plech. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-02-22]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Plech>
36. Mechanické zkoušky. *Střední škola strojírenská a elektrotechnická Brno* [online]. Brno [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: http://www.sssebrno.cz/files/ovmt/tahova_zkouska.pdf
37. Zkouška tvrdosti dle Brinella: ČSN 42 0371. *Converter* [online]. 2002 [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/jednotky/tvrdost-brinell.htm>
38. Machine d'emboutissage universelle, modèle 142. *ERICHSEN* [online]. [cit. 2017-03-15]. Dostupné z: <https://www.erichsen.de/inspection-des-pieces-en-tole/machine-d2019emboutissage-modele-100/machine-demboutissage-universelle-modele-142>
39. Formability Test: Limiting Dome Height Test. *McMaster University* [online]. [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: http://mmri.mcmaster.ca/mfl/research_test_limiting_dome.html
40. Struktura evropských značek ocelí: Výběr s ohledem na sortiment Ferony. *Ferona a. s.: Velkoobchod s hutním materiálem* [online]. [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: <http://www.ferona.cz/cze/katalog/oceli.php?type=2#>
41. Převodní tabulka značení ocelí: ČSN, EN, ISO, W.Nr., AISI. *E-konstruktor: Portál pro strojní konstruktéry* [online]. [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: <http://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/prevodni-tabulka-znaceni-oceli-dle-e>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
A_{80}	Tažnost plechu	[%]
$A_{Re(\alpha)}$	Plošná anizotropie	[-]
D_1	Původní rozměr deformační sítě	[mm]
D_r	Průměr rondele	[mm]
$D_{pol,F}$	Průměr polotovaru	[mm]
E	Modul pružnosti v tahu	[MPa]
F	Zatěžující síla Vickersovi zkoušky	[N]
F_p	Síla předzátěže	[N]
F_e	Síla na mezi kluzu	[N]
F_{max}	Maximální dosažená síla	[N]
F_z	Zkušební síla pro Rockwellovu zkoušku	[N]
F_o	Síla po odlehčení	[N]
F_b	Zatěžující síla Brinellovi zkoušky	[N]
$F_{tk, utr}$	Síla při utržení dna výtažku	[N]
$F_{tk, max}$	Maximální tahová síla	[N]
HB	Tvrdost podle Brinella	[-]
HV	Tvrdost podle Vickerse	[-]
HRx	Tvrdost podle Rockwella dle metody „x“	[-]
IE	Hodnota Erichsenovi zkoušky	[mm]
\overline{IE}	Průměrná hodnota Erichsenovi zkoušky	[mm]
\overline{IE}_i	i-tá hodnota Erichsenovi zkoušky	[mm]
IE_{max}	Maximální hodnota Erichsenovi zkoušky	[mm]
IE_{min}	Minimální hodnota Erichsenovi zkoušky	[mm]
K	Stupeň tažení	[-]
L_u	Délka vzorku po přetržení	[mm]
L_0	Délka vzorku před přetržením	[mm]
R_U	Mez úměrnosti materiálu	[MPa]
R_E	Mez pružnosti materiálu	[MPa]
R_m	Mez pevnosti materiálu	[MPa]
$R_e/R_{p0,2}$	Mez kluzu materiálu	[MPa]
$R_{p0,2(\alpha)}$	Hodnota meze kluzu na vzorku řezaném pod úhlem α	[MPa]
\bar{R}	Součinitel plastické anizotropie	[-]
R_{0°	Zjištěná hodnota anizotropie ve směru válcování	[-]
R_{45°	Zjištěná hodnota anizotropie na vzorku pod 45° k válcování	[-]
R_{90°	Zjištěná hodnota anizotropie na vzorku kolmo k válcování	[-]
R_α	Plastická anizotropie	[-]
S_0	Počáteční plocha průřezu	[mm ²]
S_u	Průřez po přetržení vzorku	[mm ²]
S_v	Plocha kulového vrchlíku	[mm ²]
T_{GE}	Stupeň hlubokotažnosti Gross-Endgelhardtovi zkoušky	[-]
Z	Kontrakce	[%]
ZP	Zásoba plasticity	[MPa]
b	Šířka vzorku před přetržením	[mm]
b_0	Šířka vzorku při 20 % deformace	[mm]
$d_{1;2}$	Dva navzájem kolmé průměry	[mm]
d_0	Průměr díry ve vzorku	[mm]
d^c	Velikost deformace	[mm]
d^c_{max}	Maximální protažení otvoru	[mm]
d^c_{min}	Minimální protažení otvoru	[mm]
$d_{0,F}$	Průměr středového otvoru ve vzorku	[mm]
$d_{1,F}$	Maximální průměr výtažku	[mm]

$d_{t,F}$	Průměr tažníku pro Fukuiho zkoušku	[mm]
h_L	Maximální hloubka vniku tažníku	[mm]
k	Součinitel zásoby plasticity	[-]
k_o	Součinitel posunu neutrální osy	[-]
l_1	Protažení deformační sítě ve směru φ_1	[mm]
l_2	Protažení deformační sítě ve směru φ_2	[mm]
l_u	Rameno ohybu	[mm]
l_v	Vzdálenost ohýbacích hran	[mm]
m_{min}	Minimální hodnota součinitele tažení	[-]
m_F	Součinitel hlubokotažnosti Fukuiho zkoušky	[-]
n	Exponent zpevnění	[-]
n_m	Počet měření	[-]
q	Jednotné číslo pro zkoušku rozšiřováním otvoru	[mm]
r_{IE}	Rozpětí hloubek	[mm]
s	Tloušťka vzorku před přetržením resp. tloušťka plechu	[mm]
s_0	Tloušťka vzorku při 20 % deformace	[mm]
t_1	Velikost vyboulení	[mm]
t_{max}	Maximální vytažená hloubka	[mm]
u	Délka úhlopříčky (průměrná)	[mm]
v_{max}	Maximální vybočení	[mm]
β	Úhel odpružení	[°]
σ_U	Napětí na mezi úměrnosti	[MPa]
σ_E	Napětí na mezi pružnosti	[MPa]
σ_K	Napětí na mezi kluzu	[MPa]
σ_P	Napětí na mezi pevnosti	[MPa]
ϵ_{max}	Maximální poměrné přetvoření	[-]

SEZNAM VÝKRESOVÉ DOKUMENTACE [10], [41]

Výkres sestavení:

Přípravek: BP-2017-1

Výrobní výkresy:

Měrka: BC-2017-1.1

Ukazatel IE: BC-2017-1.2

Kolík 7: BC-2017-1.3

Kolík 5: BC-2017-1.4

Zajišťovací matice: BC-2017-1.5

Tyč: BC-2017-1.6

Měřicí šroub: BC-2017-1.7

Aretační šroub: BC-2017-1.8

Přidržovač: BC-2017-1.9

Tažnice: BC-2017-1.10

Tažník: BC-2017-1.11

Zajišťovací šroub: BC-2017-1.12

Spodní díl: BC-2017-1.13

Horní díl: BC-2017-1.14

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Druhy zkoušených materiálů [40], [27], [24], [20]

PŘÍLOHA 1

Druhy zkoušených materiálů

Mikrolegované plechy

Materiál, který se vyznačuje s mezí kluzu od 260 do 420 MPa vhodný pro tváření za studena. Použití pro automobilový průmysl na dílce s dynamickým namáháním. U dílů z mikrolegované oceli je často kladen požadavek na vysokou mez kluzu a pevnosti hotového dílce. Obvykle se používají na části jako jsou vnitřní části dveří na autech, výztuže kapot, apod. Tato skupina plechů se oproti běžným vysokopevnostním ocelím vyznačuje minimálním množstvím uhlíku, vysokou minimální hodnotou meze kluzu a dobrou odolností proti atmosférické korozi.

Materiál CR340LA+GI/GA50-U

Jedná se o plech z mikrolegované oceli s vysokou mezí kluzu, žárově zinkovaná, určená k tváření za studena.

Ocel lze zařadit mezi titan-niobdové mikrolegované oceli. Titan zde prohlubuje účinek niobu.

Převod na evropské značení z německé normy VDA 239-100

Danému materiálu vyhovují dva typy materiálů (dle EN) se stejnými vlastnostmi avšak pouze jeden se dodává s hledaným druhem povrchu. Materiál je dále zařazen do standardního značení.

CR340LA -> HX380LAD (možné úpravy povrchu: +Z, +ZF, +ZA) -> Standardní označení HSLA 380

+GI -> +Z -> žárově pozinkováno ponorem

+GA -> +ZF -> povlak Zn a Fe nanesený difúzním žíháním

-U -> nezpracovaný

Mechanické vlastnosti:

Mez kluzu: $R_{p0,2} = 380 - 480$ MPa

Mez pevnosti: $R_m = 440 - 560$ MPa

Tažnost: $A_{80min} = 19$ %

Chemické složení:

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Al [%]	Ti [%]	Nb [%]
0,065	0,186	0,53	0,018	0,0033	0,028	0,003	0,012

Materiál CR300LA+GI/GA50-U

Jedná se o plech z mikrolegované oceli s vysokou mezí kluzu, žárově zinkovaná, určená k tváření za studena.

Materiál je mikrolegován titanem, niobem, bórem a vanadem.

Převod na evropské značení z německé normy VDA 239-100

Danému materiálu vyhovují dva typy materiálů (dle EN) se stejnými vlastnostmi avšak pouze jeden se dodává s hledaným druhem povrchu. Materiál je dále zařazen do standardního značení.

CR300LA -> HX340LAD (možné úpravy povrchu: +Z, +ZF, +ZA) -> Standardní označení HSLA 340

+GI -> +Z -> žárově pozinkováno ponorem

+GA -> +ZF -> povlak Zn a Fe nanesený difúzním žíháním

-U -> nezpracovaný

Mechanické vlastnosti:

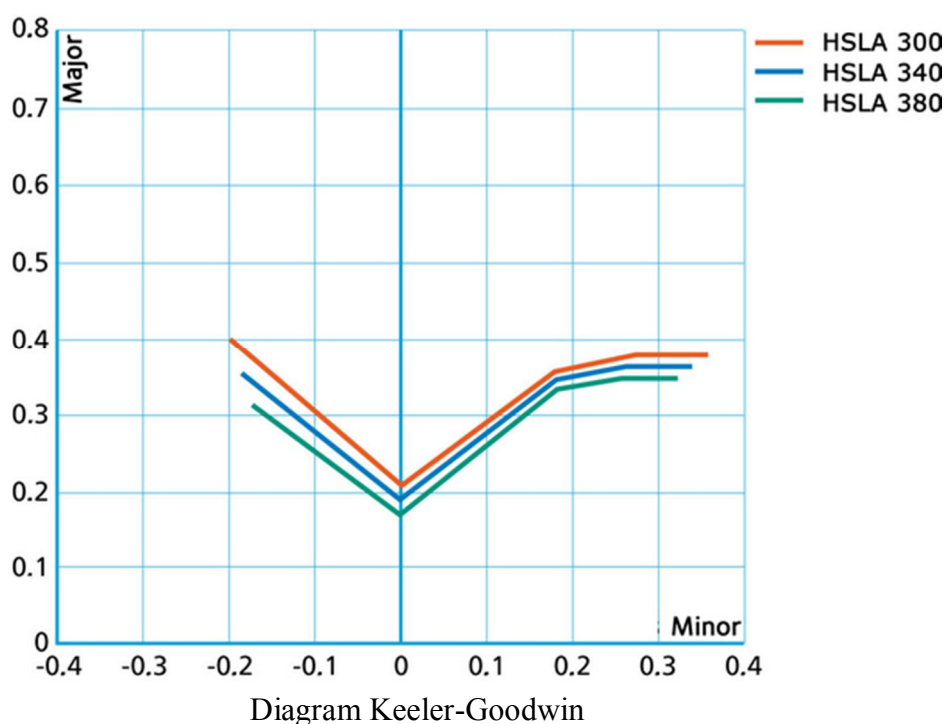
Mez kluzu: $R_{p0,2} = 340 - 420$ MPa

Mez pevnosti: $R_m = 410 - 510$ MPa

Tažnost: $A_{80min} = 21$ %

Chemické složení:

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Al [%]	Ti/Nb [%]	V/B [%]
0,073	0,214	0,503	0,018	0,0038	0,041	0,001/0,015	0,001/0,0002



Materiál DC06+ZE

Jedná se o nízkouhlíkovou ocel pro tváření za studena s vysokou jakostí povlakové vrstvy, elektrolyticky pozinkovaná.

Umožňuje tváření za tepla i za studena, je velmi vhodná k hlubokému tažení, svařování a povrchovým úpravám (pokovení, smaltování). Obvykle je daný typ plechu používán pro jeho korozní odolnost na části karoserií, strojů, střešních krytin apod.. Tváření není obtížné a dílce jsou zároveň pevné.

DC -> Deep Cool

+ZE -> elektrolyticky pozinkováno

Rozsah dodávaných jakostí: 01 – 07 -> **06**

Mechanické vlastnosti:

Mez kluzu: $R_e = 120 - 180$ MPa

Mez pevnosti: $R_m = 270 - 350$ MPa

Tažnost: $A_{80min} = 41$ %

Chemické složení:

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Al [%]	Ti [%]
0,0155	0,0134	0,171	0,0114	0,0112	-	0,002